ISBN 978-85-5953-005-6

Organizadores
Claudio de Souza Kazmierczak
Márcio Minto Fabricio

Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras:

Materiais e Sustentabilidade

ANTAC
EDITORA SCIENZA

Claudio de Souza Kazmierczak
Márcio Minto Fabricio
(organizadores)

Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras:

Materiais e Sustentabilidade

ANTAC
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

2016

Copyright © 2016 - Todos os direitos reservados.

Distribuição gratuita, venda não autorizada.

Foto da Capa: Javier Gutiérrez Marcos (Arquiteto).
Edifício Carabanchel Housing, Madrid, Espanha.

A945

Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: materiais e sustentabilidade [recurso eletrônico] / organizadores: Claudio de Souza Kazmierczak, Márcio Minto Fabricio. – [Porto Alegre] : ANTAC, 2016.

1 livro eletrônico

412 p.

ISBN 978-85-5953-005-6

DOI - http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016B001

1. Desempenho. 2. Inovação Tecnológica. 3. SINAT - Sistema Nacional de Avaliações. 4. Durabilidade. 5. Avaliação Ambiental. 6. Estruturas. I. Kazmierczak, Claudio de Souza. II. Fabricio, Márcio Minto. III. Título.

CDD 600

ANTAC
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Revisão, editoração, livro eletrônico e impressão:

EDITORA SCIENZA

Rua Juca Sabino, 21 – São Carlos – SP
(16) 3364-3346 | (16) 9 9285-3689
www.editorascienza.com.br
gustavo@editorascienza.com

Agradecimentos

À FINEP: Inovação e Pesquisa, pelo suporte à rede de pesquisa *Desenvolvimento de métodos e metodologias para avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras no âmbito do Sistema Nacional de Avaliação Técnica – INOVATEC/FINEP* e pelo apoio financeiro dado à publicação deste livro.

Finep
INOVAÇÃO E PESQUISA

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

BRASIL
GOVERNO FEDERAL

Autores e Colaboradores

Águida Gomes de Abreu

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é Pós doutoranda na Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: concreto, corrosão, sílica ativa, desempenho, durabilidade e aproveitamento de resíduos em matrizes de base cimentícia.

Alain Henrique Souza

Graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo

Engenheira Civil e Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Federal da Paraíba, Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. É professora adjunta do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba e também professora colaboradora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba. Atua principalmente nos seguintes temas: materiais pozolânicos, ligantes, cal, argamassas convencionais e históricas e resíduos industriais.

Andreia Sofia Moreira Martins

Graduação em Engenharia Civil na área de Construções pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. É aluna de Mestrado no programa da pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, no Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) da Universidade de São Paulo, com pesquisas nas áreas de Desmonte/Demolição de edifícios e gestão de resíduos da construção civil.

Ângela Borges Masuero

Graduação e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é Professora Associada da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde atua nos cursos de Graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com pesquisas nas áreas de tecnologia de concretos e argamassas, tecnologia de revestimentos, aproveitamento de resíduos em materiais de construção, desenvolvimento de novos materiais, avaliação de desempenho de materiais e componentes da construção, patologia das edificações e processos construtivos.

Bianca de Abreu Negreiros

Arquiteta e Urbanista pela Universidade Federal do Piauí. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Doutoranda na School of Mechanical Aerospace and Civil Engineering – University of Manchester.

Cintia Vieira

Cursando Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Claudio de Souza Kazmierczak

Graduação e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutorado em Engenharia pela Universidade de São Paulo. É professor Titular da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, onde atua nos cursos de Graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com pesquisas nas áreas de reciclagem de resíduos na construção civil, durabilidade e desempenho.

Cristiane Bueno

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo; Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia pelo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo; e Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Atua na área de Tecnologia da Arquitetura. Atualmente desenvolve pesquisa de Pós-Doutorado no Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo tendo como tema central a utilização da plataforma Building Information Modelling para realização de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida no processo de projeto de edifícios.

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Graduação e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutorado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professora Titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde atua nos cursos de Graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com pesquisas nas áreas de tecnologia de concretos convencionais e especiais, aproveitamento de resíduos em materiais de construção, desenvolvimento de novos materiais, avaliação de desempenho de materiais e componentes da construção, patologia e recuperação de estruturas e construções, e processos construtivos.

Edna Moura Pinto

Arquiteta e Urbanista formada pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP-Bauru) com mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído pela Universidade de São Paulo (IAU) e Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo (ISFC/IQSC/EESC). Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do rio Grande do Norte (UFRN). Atua nas áreas de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em estudos sobre o uso da madeira na Arquitetura, Tecnologias Construtivas e Segurança Contra Incêndio.

Edna Possan

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é professora Adjunta da Universidade Federal da Integração Latina Americana, onde atua no Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em durabilidade, previsão de vida útil probabilística e determinística, captura de CO_2, aproveitamento de resíduos sólidos e análise do ciclo de vida de edificações.

Eduvaldo Paulo Sichieri

Graduação e Mestrado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, Doutorado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo. É professor Titular da Universidade de São Paulo, onde atua no curso de Graduação e no Programa de Pós-graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, com pesquisas nas áreas de materiais de construção, sustentabilidade e reciclagem de resíduos industriais.

Elenize Ferreira Maciel

Graduação em Gestão Ambiental e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É pesquisadora no Núcleo de Caracterização de Materiais (NucMat), na Universidade do Vale do Rio dos Sinos, atuando principalmente nas seguintes áreas: caracterização, reciclagem, estabilização por solidificação e lixiviação de resíduos sólidos.

Feliciane Andrade Brehm

Bacharel e Licenciada em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Mestre e doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é professor adjunto, professor do programa de pós-graduação em engenharia civil e auditor interno do sistema de gestão ambiental da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em caracterização e reciclagem de resíduos sólidos, atuando principalmente nos seguintes temas: reciclagem, resíduos sólidos, caracterização de materiais e construção civil.

Felipe Amorim

Cursando Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Francisco Eli Freire dos Santos

Possui ensino-médio pelo Centro Profissionalizante Deputado Antônio Cabral. Tem experiência na área de Engenharia Civil.

Geilson Marques de Oliveira

Graduação em Engenheiro Civil e Mestradro em Engenharia de Produção pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina, com sanduíche no Instituto Eduardo Torroja (Espanha). Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) e professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPB. Desenvolve pesquisas nas áreas de reciclagem de resíduos na construção, durabilidade e desempenho de estruturas de concreto armado.

George Santos Marinho

Graduação em Física (UFRN), mestrado em Engenharia Mecânica/Termociências (UFRN), doutorados em Engenharia Mecânica/Termociências (EESC-USP). Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, atuando em pesquisas nas áreas de transferência de calor e propriedades dos materiais

Gerusa de Cássia Salado

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Graduação em Tecnologia da Construção Civil - modalidade Edifícios pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Mestrado, Doutorado e Pós-doutorado pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. É professora Doutora da Universidade Estadual de Campinas, junto à Faculdade de Tecnologia, com pesquisas nas áreas de materiais de construção, sustentabilidade e reciclagem de resíduos industriais.

Gibson Rocha Meira

Graduação em Engenharia Civil e Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal da Paraíba, Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. É professor titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da UFPB e colaborador no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE. Dedica-se aos seguintes temas: durabilidade de estruturas de concreto armado, corrosão de armaduras em estruturas de concreto, métodos de proteção e recuperação de estruturas atacadas pela corrosão de armaduras e aplicação de resíduos à construção.

Givanildo Azeredo

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba, mestre em Matériaux et Structures - Génie Civil - Ecole Nationale des Travaux Publics de lEtat, em Lyon - França, Mestre em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e Doutor em Génie Civil - Institut National Des Sciences Appliquées, em Lyon - França. É professor Associado II da Universidade Federal da Paraíba. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Construções Em Terra Crua, Alvenarias e em Estruturas de Concreto Armado.

Holmer Savastano Junior

Engenheiro civil, é Professor da Universidade de São Paulo (FZEA/USP) e coordenador do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Materiais para Biossistemas da USP (NAP BioSMat USP). Atua em área de pesquisa relacionada a materiais e técnicas não convencionais para aplicações em construção e infraestrutura.

Jairo José de Oliveira Andrade

Graduação pela Universidade de Pernambuco (UPE), com Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professor Adjunto da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), aonde atua nos cursos de Graduação em Engenharia Civil e Engenharia de Produção, bem como no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA), com pesquisas nas áreas de durabilidade, desempenho, modelagem da vida útil das estruturas de concreto e confiabilidade de componentes e sistemas.

Jeferson Alcântara Alves Sentena

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Mestrado em Engenharia Civil pela mesma Universidade. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em materiais e componentes da construção. Atua como arquiteto e como professor da educação profissional de nível técnico na região metropolitana de Porto Alegre.

João Adriano Rossignolo

Engenheiro civil, é Professor da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), com atuação nas áreas de desenvolvimento de concretos especiais, aplicação de subprodutos agroindustriais em componentes destinados à construção civil, sustentabilidade e análise de ciclo de vida (ACV) na Construção Civil.

João Ricardo Masuero

Graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é Professor Ajunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde atua nos Cursos de Graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com pesquisas nas áreas de análise estrutural, computação de alto desempenho aplicada a problemas de Mecânica do Sólidos e Dinâmica dos Fluídos, estruturas de concreto armado e processos construtivos.

José Diego Formiga Dantas

Engenheiro Civil e Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba. MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Sócio-Diretor da Construtora Original Ltda.

Juliano Fiorelli

Engenheiro civil, é Professor na Universidade de São Paulo (FZEA/USP). Desenvolve pesquisa na área de materiais não convencionais, com ênfase me painéis de partículas de subprodutos agroindustriais para aplicação em construções urbanas e rurais.

Leandro Marquetto

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pelo Centro Universitário Univates (2008) e especialização em Construção Civil pela Unisinos (2011). É professor da Faculdade de Tecnologia da Serra Gaúcha.

Leticia Mattaraia

Graduação pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestrado e Doutoranda pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) da Universidade de São Paulo (USP). Desenvolve pesquisa na área de demontagem de edifícios, analise do ciclo de vida, construção sustentável e reuso de materiais.

Luís Carlos Bonin

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Pelotas, Mestrado em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Construção Civil, atuando principalmente nos temas de Planejamento e Produção de Edificações.

Márcio Minto Fabricio

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, e Doutorado em Engenharia, pela Universidade de São Paulo. Livre docente em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia pela Universidade de São Paulo. É professor da Universidade de São Paulo.

Mariele Lunckes

Graduada em Química pela Universidade Federal de Pelotas, Mestre em Engenharia Civil pela UNISINOS, na linha de pesquisa de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. Tem experiência como pesquisadora, em desenvolvimento de novos produtos da área química.

Marina Martins Mennucci

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestrado em Ciências pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Doutorado em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Docteur pela Université Pierre et Marie Curie (ParisVI). Fez pós-doutorado em durabilidade de concretos e argamassas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atua principalmente nos seguintes temas: materiais de construção civil, corrosão, concreto, durabilidade, inibidor de corrosão e cobre.

Marlova Piva Kulakowski

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Mestrado e Doutorado em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professora Adjunta da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, onde atua nos cursos de Graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, bem como no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com pesquisas nas áreas de reciclagem de resíduos na construção civil, durabilidade e avaliação ambiental.

Natália dos Santos Petry

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Luterana do Brasil, Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professora Auxiliar do Centro Universitário Ritter dos Reis, onde atua na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Atualmente desenvolve pesquisas na área de aproveitamento de resíduos em matrizes de base cimentícia.

Nubia Mireya Garzón Barrero

Engenheira ambiental e sanitária, é Professora da Universidad de la Costa CUC (Barranquilla-Colômbia). Pesquisadora do grupo de Construções e Ambiência da FZEA/USP, com pesquisas nas áreas de avaliação de durabilidade e desempenho de materiais não convencionais.

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba e Mestrando em Engenharia Civil pela UFPE. Engenheiro civil do IFPB. Realiza pesquisas cientificas relacionadas a concreto, durabilidade e corrosão.

Simone Dornelles Venquiaruto

Graduação e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria, Especialização em Segurança do Trabalho pela Universidade Federal de Santa Maria, Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professora Assistente da Universidade Federal do Pampa, onde atua no curso do Engenharia Civil. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: controle de qualidade e durabilidade de concreto e reciclagem de resíduos na construção civil.

Valdith Lopes Jerônimo

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba e mestre em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutora em Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.

Apresentação da ANTAC Gestão 2015-2016

Fundada em 1987, a ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) é uma associação técnico-científica, de caráter multidisciplinar, que reúne pesquisadores e técnicos envolvidos com a produção e transferência de conhecimentos na área de tecnologia do ambiente construído. Esta área integra profissionais das mais diversas especialidades, tais como Engenheiros, Arquitetos, Físicos, Químicos e Sociólogos, que atuam em Construção Civil, Tecnologia de Arquitetura e Habitação. Embora constituída majoritariamente por pesquisadores e docentes vinculados a universidades e institutos de pesquisa, a Associação conta também com inúmeros associados vinculados a órgãos públicos e empresas privadas.

Para acompanhar e contribuir no desenvolvimento científico e tecnológico da construção civil, a ANTAC congrega seus associados em grupos de trabalho (GTs), que organizam discussões mais aprofundadas e específicas de cada área. Seus membros promovem publicações e participam de workshops, encontros, projetos e revisões de normas.

A ANTAC executa atividades como: a publicação da Revista Ambiente Construído integrada a biblioteca eletrônica de periódicos científicos Scielo; a participação nos fóruns de discussão sobre o tema da Ciência, Tecnologia & Inovação (C,T&I) no Ambiente Construído nas instâncias governamentais e junto às entidades liga- das aos agentes privados da cadeia produtiva; a discussão e formulação políticas de C,T&I para o Ambiente Construído com tais agentes; o estabelecimento de formas de interação com as agências de fomento à pesquisa em tecnologia do ambiente construído; aproximações temáticas e busca de atuações conjuntas com Associações afins; a promoção de eventos direcionados à comunidade de C,T&I e com impacto nos setores produtivos da construção

civil e finalmente a modernização das relações da entidade com seus grupos de trabalho, em particular para a realização dos eventos e edição de livros. Os livros que compõem a **Coleção ANTAC** são uma iniciativa da associação no âmbito da edição de livro compilando contribuições científicas de Redes Cooperativas de Pesquisa coordenadas e/ou com a participação de pesquisadores associados. Assim como a edição de livros de conteúdos acadêmicos desenvolvidos por pesquisadores ativos nos grupos de trabalho da ANTAC na área de tecnologia do ambiente construído.

ANTAC Gestão 2015-2016

Regina C. Ruschel – UNICAMP
Presidente ANTAC

José de Paula Barros Neto – UFC
Vice-presidente ANTAC

Eduardo Luis Isatto – UFRGS
Diretor Financeiro ANTAC

Paulo Roberto Pereira Andery – UFMG
Diretor Administrativo ANTAC

Alex Abiko – USP
Diretor de Relações Inter-institucionais ANTAC

Aldomar Pedrini – UFRN
Diretor de Divulgação ANTAC

Prefácio

Luis Carlos Bonin

Esta publicação apresenta a segunda parte dos resultados obtidos por uma rede de pesquisa que envolveu a participação de dez instituições tecnológicas brasileiras selecionadas no edital 07/2009 da Finep – Inovação e Pesquisa – com os objetivos de aprofundar o conhecimento sobre critérios de desempenho e desenvolver novos métodos de avaliação que possam ser utilizados no aperfeiçoamento da NBR 15575 e subsidiar a elaboração de diretrizes de avaliação de produtos de construção inovadores no Sistema Nacional de Avaliação Técnica – SiNAT. O primeiro conjunto de artigos foi publicado em 2015 e está disponível no site da rede INOVATEC.

O conjunto de artigos agora publicado aborda métodos e parâmetros para a avaliação da durabilidade e da adequação ambiental de produtos de construção. Estes temas foram escolhidos para comporem a rede de pesquisa em razão de apresentarem importantes lacunas de conhecimento que limitam a plena utilização da NBR 15575 e a operação do SiNAT. Cabe lembrar, todavia, que nas atividades de pesquisa realizadas pela rede INOVATEC não existe a pretensão de preencher todas estas lacunas de conhecimento, mas contribuir topicamente para a superação de algumas das limitações ora existentes.

É preciso destacar, ainda, o caráter multifacetado das atividades realizadas pelas diversas instituições tecnológicas participantes da rede, cada uma abordando estes temas sob as visões específicas de seus interesses, experiências e competências, produzindo resultados consequentes destas visões.

Uma primeira derivação deste novo conjunto de resultados obtidos pela rede INOVATEC é a produção de conhecimentos aplicáveis ao estudo

de materiais e técnicas não relacionados a tecnologias construtivas ou a produtos de construção específicos.

Nesta derivação aponta-se para a revisão de métodos de ensaio de durabilidade hoje praticados e para a introdução de novos procedimentos de controle da produção em sistemas construtivos tradicionais ou inovadores, os quais são necessários para assegurar que a vida útil real dos produtos de construção atinja a vida útil estimada em projeto.

De modo semelhante, aponta-se para a revisão de métodos de ensaio da adequação ambiental de produtos inovadores, com atenção especialmente voltada para aqueles produtos que incorporam resíduos oriundos da construção ou de outras cadeias produtivas, e para a definição de uma estrutura para registro de informações que permita a sistematização e difusão do conhecimento disponível sobre diversos tipos de resíduos já estudados para incorporação em produtos de construção.

Uma segunda derivação é a produção de conhecimentos relacionados a algumas tecnologias construtivas específicas, orientando a elaboração de diretrizes para a avaliação do desempenho de produtos de construção baseados nestas tecnologias construtivas.

Nesta derivação foram estudadas tecnologias tradicionais já empregadas em algumas regiões do país, porém ainda fundamentadas em uma base de conhecimentos predominantemente empírica e sem um referencial técnico e normativo adequado. Para estas tecnologias foram definidos e validados parâmetros técnicos tanto para a avaliação de desempenho quanto para o controle de produção.

As propostas de revisão de métodos de ensaio, de uso de novas ferramentas de controle de produção ou de orientação para elaboração de novas diretrizes de avaliação de desempenho são apresentadas e discutidas numa versão resumida nesta publicação e em maiores detalhes nos relatórios completos disponibilizados no site da rede INOVATEC.

Sumário

Capítulo 1

A Rede INOVATEC/Finep e sua Contribuição ao SINAT/PBQP-Habitat e à Norma Brasileira NBR 15575 1

Claudio de Souza Kazmierczak, Márcio Minto Fabricio

Capítulo 2

Metodologias para Avaliação da Estabilização/Solidificação (Encapsulação) de Resíduos Industriais para Uso em Matrizes Cimentícias, Poliméricas e Cerâmicas e para Desenvolvimento de Produtos para a Construção Civil 7

Gerusa de Cássia Salado, Eduvaldo Paulo Sichieri

Capítulo 3

Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização 37

Marlova Piva Kulakowski, Feliciane Andrade Brehm, Claudio de Souza Kazmierczak, Elenize Ferreira Maciel, Mariele Lunckes

Capítulo 4

Metodologia para Avaliação do Potencial Deletério de Resíduos em Matrizes Cimentícias: Contribuição à Norma de Desempenho 77

Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Angela Borges Masuero, Natália dos Santos Petry, Aguida Gomes de Abreu, Simone Dornelles Venquiruto

Capítulo 5

Ensaios Acelerados Empregados na Indução da Corrosão por Cloretos – Análise a Partir de Concretos com a Incorporação de Resíduos de Tijolos Moídos 117

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira, Gibson Rocha Meira, Valdith Lopes Jerônimo

Capítulo 6

Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaios Acelerados com Ciclos Térmicos 147

Claudio de Souza Kazmierczak, Marlova Piva Kulakowski, Feliciane Andrade Brehm, Jeferson Alcantara Alves Sentena, Leandro Marquetto

Capítulo 7

Avaliação de Metodologias de Envelhecimento em Painéis de Partículas de Bagaço de Cana-de-açúcar para Aplicação em Sistemas Construtivos 177

Nubia Mireya Garzón Barrero, Juliano Fiorelli, João Adriano Rossignolo, Holmer Savastano Junior

Capítulo 8

Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto 223

Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Angela Borges Masuero, Jairo José de Oliveira Andrade, Edna Possan, João Ricardo Masuero, Marina Martins Mennucci

Capítulo 9

Comportamento Estrutural de Alvenarias Construídas com Blocos de Terra Compactados (BTC) 271

Givanildo Alves de Azeredo, Geilson Marques de Oliveira, José Diego Formiga Dantas, Francisco Eli Freire dos Santos, Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo, Gibson Rocha Meira

Capítulo 10

Avaliação da Composição de Solo para Uso em Taipa - Estudo de Caso..... 295

Edna Moura Pinto, George Santos Marinho, Bianca de Abreu Negreiros, Cintia Vieira, Felipe Amorim, Alain Henrique Souza

Capítulo 11

Critérios para Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem de Materiais de Sistemas Construtivos Inovadores..... 315

Letícia Mattaraia, Andreia Martins, Márcio Minto Fabricio

Capítulo 12

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Construtivos ... 339

Cristiane Bueno, João Adriano Rossignolo

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C001

A Rede INOVATEC/Finep e sua Contribuição ao SINAT/PBQP-Habitat e à Norma Brasileira NBR 15575

1

Claudio de Souza Kazmierczak
Márcio Minto Fabricio

A Rede de Pesquisa "Desenvolvimento de métodos e metodologias para avaliação de desempenho de tecnologia inovadoras no Âmbito do Sistema Nacional de Avalição Técnica", denominada Rede INOVATEC, foi implementada em 2011 por meio do edital n. 07/2009 da Finep – Inovação e Pesquisa.

A rede foi criada com o objetivo de desenvolver e aprimorar critérios de desempenho e novos métodos de avaliação relativos à durabilidade e à vida útil de projeto de produtos e sistemas construtivos inovadores que possam subsidiar futuras diretrizes SINAT (Sistema Nacional de Aprovações Técnicas), sistema concebido em 2007 dentro do PBQP-H (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat). A rede é inspirada pelas demandas decorrentes da implementação da Norma 15575: Edifícios Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), e pretende propor adequações e complementar os métodos e critérios SINAT à nova Norma.

A Rede INOVATEC/FINEP foi estruturada em cinco subprojetos que tratam de diferentes temáticas, além de um subprojeto específico para a gestão e articulação da rede. São elas:

I – Durabilidade: avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores;

II – Ambiental: avaliação ambiental de materiais e componentes de sistemas construtivos inovadores;

III – SINAT: contribuições ao aperfeiçoamento da NBR 15575 e do SINAT;

IV – Uso e Manutenção: elaboração de manuais para a avaliação da gestão da qualidade do projeto e de tecnologias construtivas inovadoras;

V – Estrutura: definição de procedimentos para a avaliação estrutural de sistemas constritivos inovadores.

Parte dos resultados das pesquisas realizadas pela rede são compilados em livros organizados segundo os subprojetos da pesquisa.

No primeiro livro, publicado em 2015 e intitulado "Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras – Manutenção e Percepção dos Usuários", constam resultados de trabalhos efetuados nos subprojetos "SINAT" e "Uso e Manutenção".

Neste segundo livro, é apresentada uma coletânea de contribuições de pesquisadores participantes dos subprojetos "Durabilidade", "Ambiental" e "Estrutura", provenientes das seguintes instituições: FT/UNICAMP – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Campinas; FZEA/USP – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo; IAU/USP – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo; IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba; UNISINOS –Universidade do Vale do Rio dos Sinos; UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte e UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O segundo livro é dividido em doze capítulos, sendo um introdutório e os demais abordando diversos temas relacionados com as pesquisas realizadas nos subprojetos da Rede INOVATEC/FINEP. Coube aos pesquisadores responsáveis pelas instituições já citadas escolher, dentre as atividades desenvolvidas por suas instituições durante os trabalhos da rede, um tema relacionado a suas Metas, com prioridade aos subprojetos Ambiental, Sustentabilidade ou Estrutura, e coordenar a elaboração de um capítulo sumarizando a contribuição alcançada. Os capítulos foram organizados em função dos subprojetos da Rede, numa sequência que procura associar temas similares.

O capítulo 1 realiza uma breve introdução e contextualização sobre a Rede INOVATEC/FINEP, e descreve de forma sucinta os demais capítulos deste volume.

Os capítulos dois e três discutem aspectos relacionados à reciclagem de resíduos em materiais de construção civil, com foco na avaliação ambiental de materiais utilizados em sistemas construtivos inovadores.

O segundo capítulo faz uma revisão sobre resíduos de construção civil e resíduos industriais, apresenta dados sobre a política nacional de resíduos sólidos, descreve a forma como as normas brasileiras classificam resíduos sólidos e discute alguns aspectos da Resolução 307 do CONAMA. Na sequência, são listadas algumas técnicas utilizadas para a avaliação da estabilização e solidificação de resíduos industriais para uso na construção civil, considerando os parâmetros da NBR10004.

O terceiro capítulo discute de forma mais aprofundada a avaliação ambiental de produtos e sistemas construtivos inovadores com resíduos. São apresentados os conceitos de lixiviação, solubilização e estabilização por solidificação com foco em componentes utilizados na construção civil. A estabilidade de resíduos incorporados a materiais de construção com matriz de cerâmica vermelha e de cimento Portland é discutida, sendo apresentada uma revisão sobre os principais métodos utilizados para a extração do lixiviado. Por fim, a forma de avaliação proposta pela ABNT NBR10004 é criticada, sugerindo-se um novo método para a avaliação ambiental de produtos e sistemas construtivos inovadores com resíduos.

Nos capítulos quatro a dez são apresentados estudos relacionados com a durabilidade de sistemas construtivos inovadores.

O quarto capítulo tem o objetivo de fornecer subsídios para a avaliação do potencial deletério decorrente do uso de resíduos em matrizes cimentícias. A partir de um estudo exploratório, foram identificados 37 tipos de resíduos cuja aplicação na construção civil vem sendo objeto de pesquisas, e para cada um deles foi realizado um levantamento de dados visando sua caracterização química e mineralógica e identificados os principais processos de degradação esperados a partir de sua incorporação a uma matriz de cimento Portland. O trabalho propõe, a partir de um fluxograma, uma sistematização para a análise do efeito deletério da incorporação de resíduos em concretos e argamassas.

O quinto capítulo apresenta uma relação de métodos de ensaio utilizados para a avaliação da indução da corrosão a partir da penetração de cloretos em concreto armado, discutindo suas particularidades, e expõe os resultados de um estudo experimental em concreto armado com adição de resíduos

de cerâmica vermelha (obtidos pela moagem de tijolos). No estudo, são comparados diferentes métodos acelerados de indução da corrosão, concluindo-se que para este tipo de resíduo os métodos de imersão e secagem são mais apropriados e permitem uma avaliação mais adequada do processo de corrosão.

O sexto capítulo apresenta uma metodologia para a avaliação da durabilidade de revestimentos de argamassa aplicados sobre alvenaria de cerâmica vermelha. É realizada uma revisão sobre os mecanismos de deterioração a que as alvenarias do sistema de fechamento vertical de edifícios estão sujeitas. Discute-se ainda diversos métodos de ensaio que podem ser utilizados para a avaliação de sua deterioração. A partir de um programa experimental, em que alvenarias de cerâmica vermelha revestidas com argamassa com incorporação de resíduos obtidos pela moagem de concreto são submetidas ao ensaio acelerado com ciclos de exposição ao calor e choque térmico por aspersão de água especificado na ABNT NBR 15575-4, é realizada a determinação do nível de degradação do revestimento, a partir de diversos métodos de avaliação, e criticada a eficiência de cada um dos métodos.

No sétimo capítulo são avaliadas metodologias de envelhecimento acelerado para painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. São apresentados os conceitos relacionados com a durabilidade, os mecanismos e agentes de degradação que interferem no desempenho dos painéis, assim como metodologias utilizadas para a sua avaliação. Em particular, é apresentada uma metodologia para a avaliação comparativa da durabilidade a partir de ensaios entre painéis com partículas de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente à base de óleo de mamona e painéis de partículas de madeira comerciais (*Medium Density Particleboard*) e resina de ureia-formaldeído.

O oitavo capítulo discute a previsão de vida útil de estruturas de concreto. São listadas as principais normas internacionais referentes à durabilidade e a previsão de vida útil de sistemas estruturais em concreto, e apresentadas noções sobre desempenho, durabilidade e vida útil. É proposta uma metodologia para a modelagem e a previsão da vida útil de estruturas de concreto, a partir do levantamento de dados de degradação e de sua simulação, segundo dois modelos de degradação. Além disso, são discutidos os principais parâmetros que geram variabilidade nas propriedades do concreto armado.

Nos capítulos nove e dez são apresentadas contribuições para a avaliação estrutural de sistemas construtivos baseados em terra, sendo um sobre alvenarias com blocos de terra compactada e o outro sobre o uso de taipa.

O nono capítulo descreve uma metodologia para a avaliação estrutural de alvenarias construídas com blocos de terra compactada. É realizada uma pequena revisão sobre estruturas de terra, sobre o comportamento mecânico de alvenarias e sobre os tipos de carregamento e formas de ruptura esperados. São apresentados a metodologia e os resultados de um estudo experimental de ruptura de dois tipos de alvenarias com blocos de terra compactada, uma na forma de "L" e outra com uma abertura, abordando-se as particularidades dos resultados em função do comportamento frágil do material "terra".

No décimo capítulo é realizada uma avaliação de composição de solo para uso em taipa a partir de um estudo de caso. São apresentadas as formas de execução de taipa e discutidas algumas deficiências deste tipo de sistema construtivo. O capítulo apresenta os resultados de um estudo de caracterização de dois tipos de solo utilizados na construção de taipa, comparando suas características com a durabilidade esperada para cada sistema.

Por fim, nos dois capítulos que encerram este livro são discutidos critérios para a avaliação do potencial de desmonte e a metodologia para avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos.

No décimo primeiro capítulo são listados diversos critérios para a avaliação do potencial de desmonte e reciclagem de um sistema construtivo inovador a serem utilizados na etapa de projeto. É discutida a influência do tipo de conexões no processo de desmontagem de sistemas construtivos e avaliada a forma como pode ser realizada a reciclagem da madeira, do aço, de alvenarias e do concreto. São apresentados critérios para a avaliação do potencial de desmonte, além de proposto um checklist para a caracterização de sistemas construtivos, com relação à facilidade de desmonte.

No décimo segundo capítulo é descrita a metodologia para avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos, explicando-se como são realizados a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário de ciclo de vida, a avaliação de impacto de ciclo de vida e a interpretação de ciclo de vida.

O segundo livro da rede INOVATEC/ FINEP consolida as contribuições de pesquisadores brasileiros para o estudo e a discussão da temática desempenho, durabilidade e sustentabilidade de produtos e sistemas

construtivos inovadores, apresenta colaborações para aprimoramento do Sistema Nacional de Avaliação Técnica e compõe um conjunto de referências atualizadas para empresas e pesquisadores envolvidos com a avaliação e desenvolvimento de sistemas construtivos inovadores.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C002

2 Metodologias para Avaliação da Estabilização/Solidificação (Encapsulação) de Resíduos Industriais para Uso em Matrizes Cimentícias, Poliméricas e Cerâmicas e para Desenvolvimento de Produtos para a Construção Civil

Gerusa de Cássia Salado
Eduvaldo Paulo Sichieri

1. Introdução

O ser humano é, por natureza, um agente transformador do ambiente. Desde a sua origem, o homem vem provocando alterações na paisagem e poluindo o planeta. Após a Revolução Industrial, essas mudanças assumiram escala logarítmica em consequência dos novos processos de produção e do aumento do consumo, também exponencial, desencadeado pelo crescimento da população humana; além das enormes transformações na paisagem, provocadas pelas cidades e pelos modos de produção no campo.

Nesse contexto, o crescimento populacional tem grande influência na questão da sustentabilidade, uma vez que incide no aumento do consumo em geral, da geração de resíduos e da demanda por novas construções (CASAGRANDE JR, 2004).

O aumento populacional e o aumento do consumo agem como devoradores dos recursos naturais e geram cada vez mais resíduos, desde a produção industrial até o descarte final do lixo produzido, incluindo a geração de CO_2 e a poluição do solo e dos rios (EDWARDS, 2008).

De acordo com a *World Comission on Environment and Development* (2007), prevê-se que até o ano de 2050 a classe média mundial (maior parcela da população consumista) triplicará, triplicando também o volume de lixo descartado.

Dessa forma, segundo Sanches (2001), a sociedade se vê entre duas opções: ou a descontinuidade do consumo ou uma postura menos poluidora. Em outras palavras, a humanidade se depara com a necessidade de buscar alternativas menos poluidoras tanto para a produção como para o consumo, a fim de não comprometer o futuro das novas gerações.

Vive-se, conquanto, em plena era do consumo, na qual o bem material e o individualismo se evidenciam. Como, então, atender as necessidades individuais de forma sustentável?

A lacuna formada entre o crescimento mundial e a sustentabilidade provocou as primeiras iniciativas em busca da redução da emissão dos diversos resíduos e efluentes. Eventos mundiais como a Conferência de Estocolmo – ocorrida na Suécia em 1972 – e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (RIO-92) – realizada no Brasil, entre outros, deram origem a documentos como a Agenda 21, o Protocolo de Kyoto, a Convenção de Viena, o Protocolo de Montreal etc, que representam a preocupação da sociedade com as questões relacionadas aos resíduos domésticos e industriais.

Para Room *et al.* (2004), os eventos realizados entre nações possuem o objetivo de firmar acordos internacionais de manutenção do meio ambiente e mostram que as mudanças são obrigatórias.

De maneira análoga, Kiperstock (2000) afirma que é necessário intervir nos processos produtivos, sugerindo a reciclagem em toda a cadeia produtiva como a forma menos onerosa para as indústrias. Rogers e Tibben-Lembke (2001), por sua vez, sustentam que cada cadeia produtiva deve ser responsável por eliminar suas emissões internamente e apontam a reciclagem e o reaproveitamento de resíduos como estratégias ideais para a concretização desse processo.

Observando-se essas questões, constata-se um grande desafio para o mundo industrial: produzir com o mínimo de danos ao ambiente, devendo-se reutilizar cada vez mais materiais descartados como lixo.

2. Os Resíduos Industriais e da Construção Civil e os Impactos Ambientais

Os resíduos são produzidos em todos os estágios das atividades humanas (industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços etc). Podem se apresentar nos estados sólido, gasoso e líquido, e variam em termos de composição e de volume conforme as práticas de consumo e os métodos de produção.

Com relação à geração de resíduos, conforme o Banco Mundial (2012), a população que mais produz lixo é a dos Estados Unidos, com aproximadamente 2,5 kg por habitante/dia; enquanto a média mundial para esse índice gira em torno de 1,2 kg por dia, para cada habitante das áreas urbanas.

Dentro desse contexto, o estudo realizado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) em 400 municípios brasileiros, intitulado *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2014*, constatou que a quantia média de lixo gerado no Brasil foi de aproximadamente 1,062 kg por habitante/dia. No total, segundo Abrelpe (2015), o volume de resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil no ano de 2014 foi de 78,6 milhões de toneladas, isto é, 2,9% a mais que no ano de 2013, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%. Considerando o período entre os anos de 2003 a 2014, a geração de lixo cresceu 29%, superando a taxa de crescimento populacional urbano, que foi de cerca de 6%.

Esses dados são preocupantes, uma vez que o Brasil não possui o mesmo grau de desenvolvimento dos países europeus e dos Estados Unidos, e a coleta seletiva e a reciclagem não crescem na mesma proporção do lixo gerado.

De acordo com estatísticas de Eurostat *apud* Smart Cities (2015), 43% dos resíduos produzidos na União Européia são encaminhados para reciclagem ou compostagem. No Brasil, conforme Cempre (2013), somente 27% dos resíduos recicláveis (fração seca) coletados nas cidades foram efetivamente recuperados em 2012, ou seja, foram desviados dos aterros e lixões e retornaram à atividade produtiva.

A destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, segundo o Censo (2010) *apud* Cempre (2013) é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Fonte: Censo (2010) *apud* Cempre (2013).

% RSU	Destinação
80,3	Recolhido por caminhões e levado para lixões, aterros ou reciclagem
9,6	Queimado na propriedade
7,2	Disposto em caçamba
2,0	Jogado em terreno baldio ou logradouro
0,6	Enterrado na propriedade
0,2	Outra destinação
0,1	Jogado em rios, lagos ou mar

Como se sabe, muitos resíduos sólidos são abandonados em locais inadequados e proibidos, como em beiras de estradas e terrenos baldios. Exemplo disso é visto na Figura 1.



Figura 1. Lixo acumulado em estrada de terra, Limeira - SP. Autor: Gerusa Salado.

Abrelpe (2015) aponta que apenas cerca de 71 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos gerados no ano de 2014 foram coletados. Informa ademais que, além de aproximadamente 7,0 milhões de toneladas de resíduos não terem sido coletadas, 41,6% do material que foi coletado - cerca de 30

milhões de toneladas - seguiram para lixões e aterros controlados, trazendo consideráveis danos ao meio ambiente - Figura 2.



Figura 2. Lixo depositado a céu aberto em aterro controlado, Limeira - SP. Autor: Gerusa Salado.

Contudo, os resíduos sólidos gerados no Brasil e no mundo não são caracterizados apenas pelo lixo comumente oriundo de habitações, escolas, hospitais, indústrias etc. A cadeia produtiva da construção civil, responsável por cerca de 8% do Produto Interno Bruto nacional, além de depender da extração de matérias-primas naturais, como a areia, a madeira, as pedras etc, produz imensos volumes de resíduos.

Segundo Sartor e Lamberts (2008), levantamentos indicaram que a construção e a manutenção de obras de edificações em geral consomem até 75% dos recursos naturais extraídos no planeta. Concomitantemente, a ineficiência em alguns dos processos produtivos faz com que a indústria da construção civil seja reconhecidamente uma grande geradora de resíduos: quanto a isso, os levantamentos também mostraram que o lixo resultante da construção, manutenção e demolição de casas e edifícios representa de 40% a 60% dos resíduos sólidos urbanos (SARTOR e LAMBERTS, 2008).

O lixo produzido pela indústria da construção civil, portanto, representa um volume considerável. Apenas no ano de 2014 foram coletadas cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil, ou seja, 4,1% a mais que em 2013. Porém, sabe-se que as quantidades reais são ainda maiores, visto que os municípios em geral coletam somente os RCD depositados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2015).

O maior problema com relação aos restos de materiais de construção gerados por pequenas reformas, construções e demolições refere-se ao seu descarte, que quando feito de maneira inadequada, isto é, como se descarta o lixo comum, acaba gerando sérios danos para o meio ambiente. Geralmente, esses resíduos são jogados em terrenos baldios, beiras de estradas etc, como mostra a Figura 3.



Figura 3. Entulho em São Carlos (SP), abandonado em área periférica da cidade. Autor: Gerusa Salado.

Além do volume acumulado nos depósitos e aterros sanitários, uma das maiores preocupações com relação aos resíduos descartados inadequadamente diz respeito aos impactos que estes podem ter sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente (solo, água e ar); sobretudo, os resíduos perigosos, produzidos em sua grande maioria pelas indústrias (KRAEMER, 2012a).

A indústria necessita de matérias-primas, como o ferro, a água e a madeira, para a produção de bens necessários à sociedade. Por sua vez, os processos de manufatura produzem lixos, os quais podem ser inofensivos ou tóxicos.

O lixo gerado pelas atividades agrícolas e industriais é tecnicamente conhecido como *resíduo. Rejeitos* são os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não seja a disposição final ambientalmente adequada (KRAEMER, 2012a).

Seguindo o mesmo raciocínio, os *resíduos industriais* são aqueles originados nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: metalúrgico, químico, petroquímico, papelaria, indústria alimentícia etc. Esse tipo de lixo – industrial – é bastante variado e pode ser composto por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas etc. Nessa categoria, inclui-se grande quantidade de lixo tóxico, que necessita de tratamento especial pelo seu potencial de envenenamento.

O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais (acidentais ou não) ao meio ambiente. Nele, muitas vezes, estão incluídos produtos químicos (como cianureto, pesticidas e solventes), metais (como mercúrio, cádmio e chumbo) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais nos quais são despejados. Quando descartados, os resíduos industriais sólidos são amontoados e enterrados, os líquidos são despejados em rios e mares e os gases são lançados no ar. Nessas condições, a saúde do meio ambiente e dos seres vivos torna-se ameaçada, podendo ocorrer grandes tragédias ambientais.

Pode-se dizer que cerca de 10 a 20% dos resíduos industriais podem ser perigosos ao homem e ao ecossistema. Os metais pesados (elementos de elevado peso molecular), por exemplo, quando absorvidos pelo ser humano, depositam-se nos tecidos ósseo e gorduroso e deslocam minerais nobres dos ossos e músculos para a circulação, podendo provocar diversas doenças. Desse modo, o consumo habitual de água e alimentos como peixes de água doce ou do mar contaminados com metais pesados coloca em risco a saúde humana.

Da mesma forma, as populações que moram em torno de fábricas de baterias artesanais, de indústrias de cloro-soda que utilizam mercúrio ou de

indústrias navais, siderúrgicas e metalúrgicas também correm risco de serem contaminadas.

Os metais pesados são muito utilizados pelas indústrias e estão presentes na composição de vários produtos. A Tabela 2 apresenta os principais metais usados pelas indústrias, suas fontes e riscos à saúde humana.

Tabela 2 Principais metais usados pelas indústrias e seus riscos à saúde humana. Fonte: Kraemer, 2012a.

Metais	De onde vem	Efeitos
Alumínio	Produção de artefatos de alumínio; serralheria; soldagem de medicamentos (antiácidos) e tratamento convencional de água	Anemia por deficiência de ferro; intoxicação crônica
Arsênio	Metalurgia; manufatura de vidros e fundição	Câncer (seios paranasais)
Cádmio	Soldas; tabaco; baterias e pilhas	Câncer de pulmões e próstata; lesão nos rins
Chumbo	Fabricação e reciclagem de baterias de autos; indústria de tintas; pintura em cerâmica; soldagem	Saturnismo (cólicas abdominais, tremores, fraqueza muscular, lesão renal e cerebral)
Cobalto	Preparo de ferramentas de corte e furadoras	Fibrose pulmonar (endurecimento do pulmão) que pode levar à morte
Cromo	Indústrias de corantes, esmaltes, tintas, ligas de aço e níquel, cromagem de metais	Asma (bronquite); câncer
Fósforo amarelo	Veneno para baratas; rodenticidas (tipo de inseticida usado na lavoura) e fogos de artifício	Náuseas; gastrite; odor de alho; fezes e vômitos fosforescentes; dor muscular; torpor; choque; coma e até morte
Mercúrio	Moldes industriais; certas indústrias de cloro-soda; garimpo de ouro; lâmpadas fluorescentes	Intoxicação do sistema nervoso central
Níquel	Baterias; aramados; fundição e niquelagem de metais; refinarias	Câncer de pulmão e seios paranasais
Fumos metálicos	Vapores (de cobre, cádmio, ferro, manganês, níquel e zinco) da soldagem industrial ou da galvanização de metais	Febre dos fumos metálicos (febre, tosse, cansaço e dores musculares) – parecido com pneumonia

Por outro lado, um resíduo não é, por definição, algo nocivo. Muitos resíduos podem ser transformados em subprodutos ou em matérias-primas

para outras linhas de produção (KRAEMER, 2012a). A manipulação correta de um resíduo, entretanto, tem grande importância para o controle do risco que ele representa, pois um resíduo relativamente inofensivo, em mãos inexperientes, pode transformar-se em um risco ambiental muito grave.

Quanto aos resíduos sólidos industriais, conforme FIESP (2012a), não existem dados confiáveis sobre sua geração, tratamento e disposição final, o que inviabiliza investimentos, financiamentos e o desenvolvimento do setor.

Apesar dessa inexatidão, a FIESP (2012b) divulgou alguns dados referentes aos anos de 2006 e 2007, ressaltando, porém, que os números não refletem o total dos resíduos sólidos industriais (RSI) produzidos no período, visto que a responsabilidade pelo seu gerenciamento é do próprio gerador.

Dentro dessas condições, portanto, foram levantadas as quantidades de RSI recebidos e tratados por empresas privadas no Brasil, de acordo com a tecnologia utilizada no processo de tratamento. A Tabela 3 expõe estas quantidades no período de 2006 e 2007 (FIESP, 2012b).

Tabela 3 Quantidades de resíduos sólidos industriais tratados em 2006 e 2007. Fonte: Pesquisas Abrelpe *apud* FIESP, 2012b.

Tecnologias	**RSI Tratados**	
	2006	**2007**
	Quantidade (t/ano)	**Quantidade (t/ano)**
Aterro para resíduos não inertes	2.985.521	3.655.372
Aterro para resíduos inertes	342.617	579.247
Aterro para resíduos perigosos	170.776	251.646
Coprocessamento em fornos de cimento	790.000	981.000
Incineração	64.286	71.265
Outros tratamentos térmicos	59.225	69.314
Tratamentos biológicos	30.683	315.909
Outras tecnologias	14.584	17.746

A Figura 4 mostra o percentual das quantidades, em relação ao total de resíduos sólidos industriais tratados, em 2006 e 2007, respectivamente.

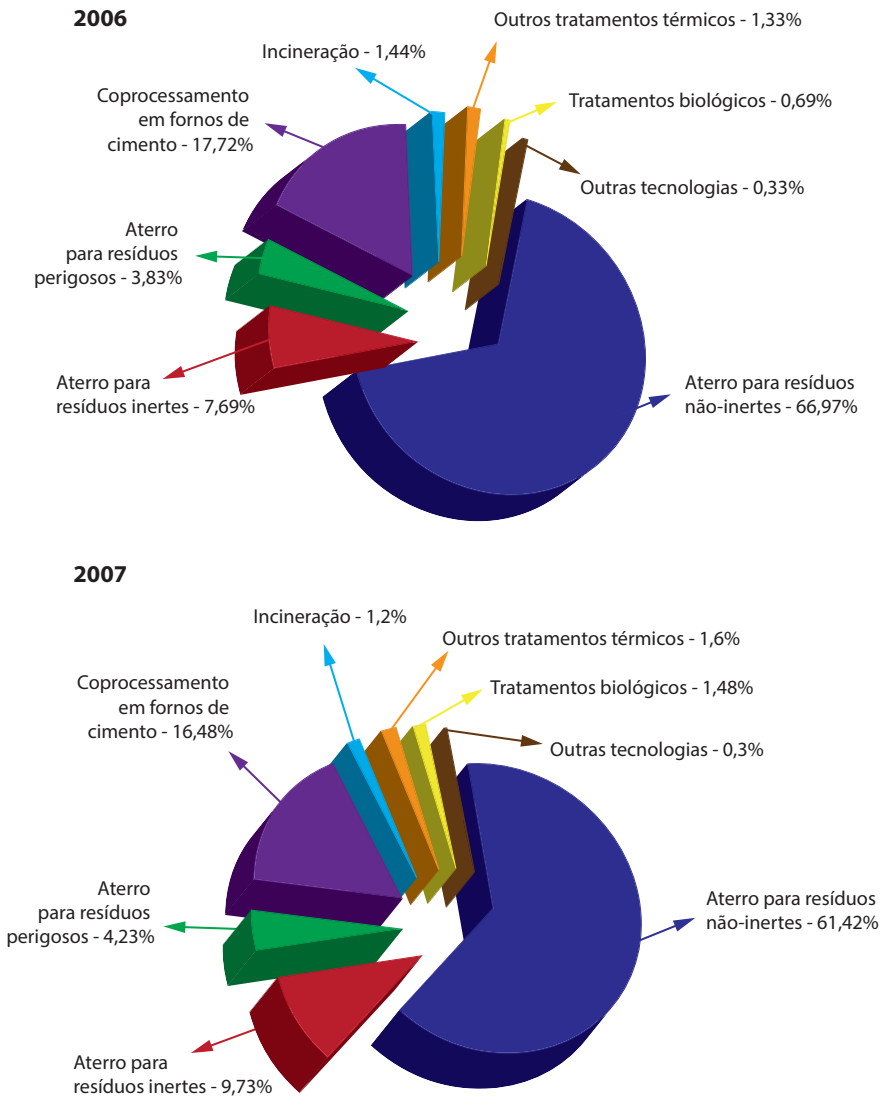


Figura 4. Percentuais de resíduos sólidos industriais tratados em 2006 e 2007. Fonte: Pesquisas Abrelpe *apud* FIESP, 2012b.

Considerando resíduos perigosos aqueles tratados pelas seguintes tecnologias: Aterro para Resíduos Perigosos, Coprocessamento em Fornos de Cimento, Incineração, Outros Tratamentos Térmicos, Tratamentos Biológicos e Outras Tecnologias, tem-se a Tabela 4.

Tabela 4 Resíduos sólidos industriais perigosos e não perigosos tratados em 2006 e 2007. Fonte: Pesquisas Abrelpe *apud* FIESP, 2012b.

Classificação	2006		2007	
	Quantidade (t/ano)	%	Quantidade (t/ano)	%
Perigosos	1.009.953	22,66	1.545.360	26,00
Não perigosos	3.447.739	77,34	4.406.139	74,03
Total	4.457.692	100,00	5.951.499	100,00

Nas indústrias, o tratamento dos resíduos constituintes de passivos ambientais teve crescimento. A Tabela 5 apresenta as quantidades dos resíduos industriais tratados em 2006 e 2007 em relação à origem dos resíduos.

Tabela 5 Resíduos sólidos industriais tratados em 2006 e 2007 em relação à sua origem. Fonte: Pesquisas Abrelpe *apud* FIESP, 2012b.

Origem	2006		2007	
	Quantidade (t/ano)	%	Quantidade (t/ano)	%
Oriundos da geração normal das indústrias	3.689.702	82,77	4.358.232	72,23
Oriundo de passivos ambientais das indústrias	767.990	17,23	1.593.268	26,77

Conforme relata outra fonte, a Agência Brasil (2009), o presidente da Associação Brasileira das Empresas de Tratamento de Resíduos (Abetre), Diógenes Del Bel, afirmou que no ano de 2008, as empresas que prestam serviço especializado e adequado para o setor de destinação final de resíduos não aproveitáveis processaram mais de 7,0 milhões de toneladas de resíduos industriais.

Os tratamentos empregados por essas empresas incluem o coprocessamento em fornos de produção de cimento, incineração, tratamentos biológicos para solos contaminados, descontaminação de transformadores e de lâmpadas, além das tecnologias que tratam da recuperação e reciclagem de óleos lubrificantes.

Segundo Del Bel *apud* Agência Brasil (2009), em 2009, o Brasil possuía 160 empresas para o tratamento de resíduos sólidos; um número pequeno em comparação a outros países, como o Reino Unido, por exemplo, onde já existiam cerca de 300 empresas somente para dar destinação final a resíduos eletroeletrônicos.

2.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tem como objetivo combater os principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos no Brasil. Visa à prevenção e à redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado) (BRASIL, 2015).

Para isso, a lei institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, cidadãos e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na Logística Reversa dos resíduos e embalagens pós-consumo. Também institui instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal, metropolitano e municipal e impõe que os particulares elaborem seus Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Segundo Cempre (2013), a elaboração de planos municipais de gerenciamento de resíduos é condição legal para o acesso à recursos públicos federais, como os que se destinam à estrutura de coleta e construção de aterros sanitários.

Nas indústrias, a gestão dos resíduos já tem se incorporado ao planejamento e à visão de "cadeia de valor". Ao reduzir o uso de insumos extraídos da natureza com risco de impactos ambientais, evitar danos à biodiversidade, economizar energia e diminuir emissões de gases de efeito estufa, a reciclagem representa uma vantagem competitiva para as indústrias. Apesar disso, em 2013, apenas 14 % dos municípios brasileiros ofereciam coleta seletiva; sendo, destes, 86% situados no Sul e Sudeste do país.

Pode-se dizer que a PNRS incentiva a ação de catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, tanto na Logística Reversa quanto na Coleta Seletiva e objetiva contribuir para a eliminação dos lixões. Além dos ganhos ambientais e sociais, com o avanço da logística reversa, o crescimento da oferta pode reduzir o preço dos materiais recicláveis, considerando os ganhos econômicos com a substituição de matéria-prima virgem por reciclada, emissões de carbono, energia e impactos à biodiversidade.

3. Classificação e Tratamento de Resíduos Segundo as Normas Brasileiras

Segundo Kraemer (2012a), desde os anos 50, os resíduos químicos e tóxicos vêm causando desastres cada vez mais frequentes e sérios. As indústrias eliminam resíduos por vários processos, nos estados gasoso, líquido e sólido. Geralmente, os resíduos sólidos são amontoados e enterrados, enquanto que os resíduos líquidos são despejados nos rios e mares, e os resíduos gasosos são lançados no ar. Assim, ocorre a poluição e contaminação do solo, da água e do ar.

Justamente por serem tão danosos, alguns resíduos perigosos são descartados aleatoriamente ou jogados no meio ambiente, pois não se sabe como lidar com eles com segurança e espera-se que o ambiente absorva as substâncias tóxicas. Porém, essa não é a solução correta para o problema, já que muitos metais e produtos químicos não são naturais, nem biodegradáveis.

Consequentemente, quanto mais se enterram os resíduos, ou os lançam na água e no ar, mais os ciclos naturais são ameaçados e o ambiente torna-se poluído. Segundo Kraemer (2012a), atualmente existem mais de 7,0 milhões de produtos químicos identificados e a cada ano outros milhares são descobertos, o que dificulta cada vez mais o tratamento efetivo dos resíduos.

Para evitar a poluição do meio ambiente e a contaminação dos seres vivos, as indústrias não podem despejar seus dejetos no lixo comum sem passar por tratamentos e cuidados especiais (CIMM, 2010). No Brasil, quem define os parâmetros para tratamento desses resíduos é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Desse modo, a NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 2004a) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Essa classificação envolve a identificação do processo ou atividade que originou os resíduos sólidos, a identificação e características dos seus componentes, além da comparação desses componentes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT, 2004a).

A NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação – divide os resíduos conforme as reações que produzem quando são colocados em contato com o meio ambiente e os classifica em dois grupos:

- **perigosos** (Classe I- contaminantes e tóxicos);
- **não perigosos** (Classe II – podem ou não ser contaminantes).

Os resíduos Classe II são divididos em:

- **não-inertes** (Classe II A - possivelmente contaminantes);
- **inertes** (Classe II B – não contaminantes).

Desses grupos, os resíduos das classes I e II A exigem atenção especial por serem tóxicos e/ou contaminantes.

Os resíduos das classes I e II devem ser tratados e destinados em instalações apropriadas para tal fim. Por exemplo, os aterros industriais precisam de mantas impermeáveis e diversas camadas de proteção para evitar a contaminação do solo e das águas, além de instalações preparadas para receber o lixo industrial, normalmente operado por empresas privadas (KRAEMER, 2012b).

Para as atividades de gerenciamento de resíduos, a NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação – é uma ferramenta imprescindível, sendo aplicada por instituições e órgãos fiscalizadores. A partir da classificação estipulada pelo documento, o responsável por gerar um resíduo pode facilmente identificar o potencial de risco do material, bem como identificar as melhores alternativas para destinação final e/ou reciclagem.

Abaixo segue uma descrição detalhada das três classes compreendidas nessa norma técnica:

- **Classe I** - Resíduos perigosos: são aqueles que apresentam riscos significativos à saúde pública e ao meio ambiente, quando gerenciados de forma inadequada. Exigem tratamento e disposição especiais em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Podem ocasionar a incidência ou o agravamento de doenças e mortalidade.
- **Classe II A** - Resíduos não-inertes: são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, tornando-a não potável. São, basicamente, os resíduos com as características do lixo doméstico.
- **Classe II B** - Resíduos inertes: são aqueles que, ao serem submetidos a testes de solubilização, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isso significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo. Esses resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo (se degradam muito lentamente) e muitos deles são recicláveis. Estão nessa classificação, por exemplo, os entulhos de demolição, pedras e areias retirados de escavações.

A Tabela 6 mostra as origens e as possíveis classes dos diferentes resíduos, bem como os agentes responsáveis pelo seu gerenciamento e destinação final adequada.

Tabela 6 Origens, possíveis classes e agentes responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos. Fonte: Adaptado de Kraemer, 2012b.

Origem	Possíveis Classes	Responsável
Domiciliar	II A	Prefeitura
Comercial	II A, II B	Prefeitura
Industrial	I, II A, II B	Gerador do resíduo
Público	II A, II B	Prefeitura
Serviços de Saúde	I, II A, II B	Gerador do resíduo
Portos, aeroportos e terminais ferroviários	I, II A, II B	Gerador do resíduo
Agrícola	I, II A, II B	Gerador do resíduo
Entulho	II B	Gerador do resíduo

Para ser possível classificar os resíduos deve-se, inicialmente, realizar ensaios de lixiviação e solubilização em amostras, seguindo as normas técnicas NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004b) e NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004c).

Os componentes encontrados nos ensaios devem ser comparados às tabelas anexas à NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação – as quais determinam a existência de periculosidade e as características (inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, reatividade e patogenicidade) do resíduo.

Dessa maneira, caso um resíduo seja classificado como classe I, ele não poderá ser incorporado a outros produtos, devido aos riscos que oferece à saúde dos seres vivos e ao meio ambiente, e deverá receber tratamento especial e adequado de empresas especializadas.

Quando um resíduo for classificado como classe II A, ele poderá ser incorporado a outros produtos com certas restrições e de maneira adequada, conforme o grau e características contaminantes que apresenta.

Por fim, quando um resíduo for classificado como classe II B, ele poderá ser incorporado em outros produtos sem restrições.

O fluxograma apresentado na Figura 5 mostra os passos que devem ser seguidos para a classificação de um resíduo.

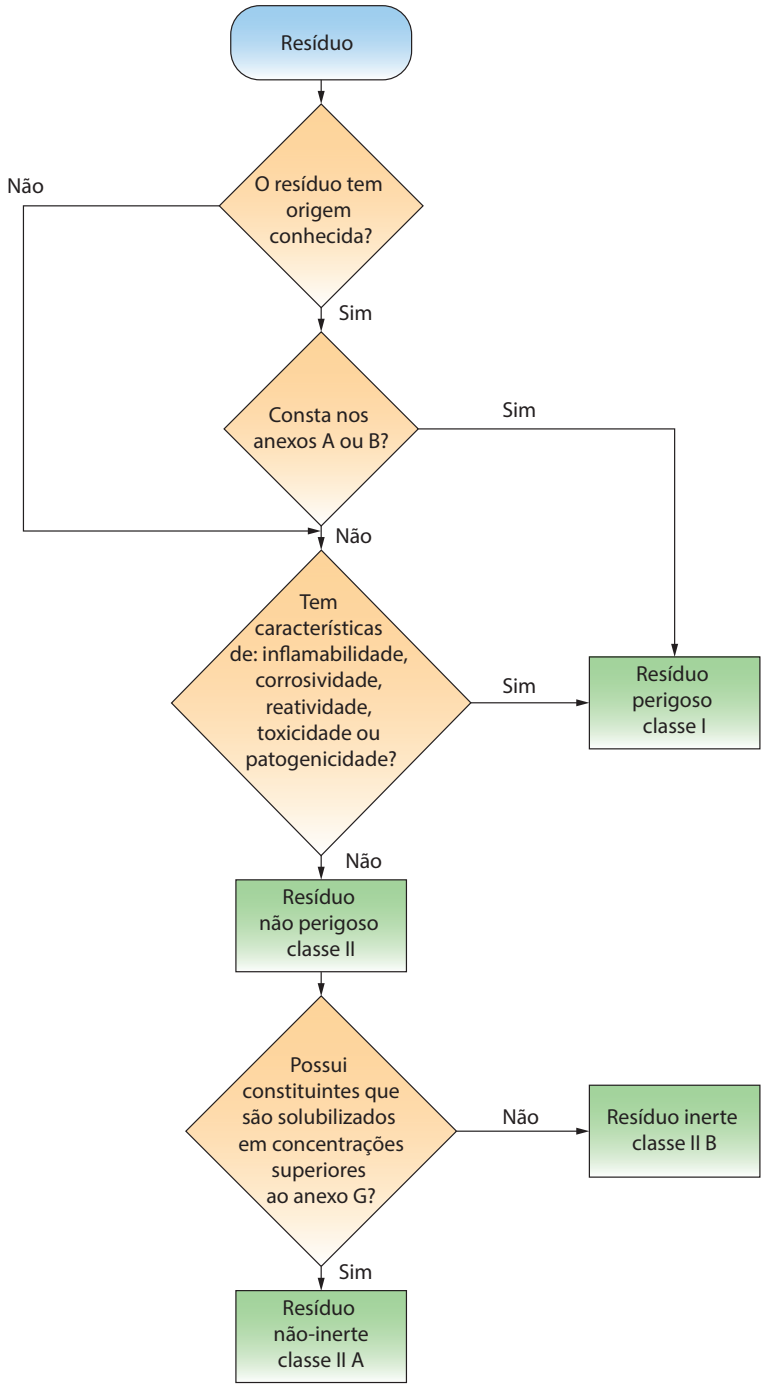


Figura 5. Caracterização e classificação de resíduos sólidos. Fonte: ABNT, 2004a, p.vi.

3.1. Resolução nº 307 - CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA publicou a Resolução nº 307 em 2002, para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

De acordo com a resolução, os responsáveis pela produção de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos restos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como pelas sobras resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos.

Os resíduos da construção civil, por sua vez, deverão ser discriminados conforme a seguinte classificação:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

  a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

  b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc), argamassa e concreto;

  c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc) produzidas nos canteiros de obras;

- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, as quais permitem a sua reciclagem ou recuperação;

- Classe D – são resíduos perigosos, oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos, bem como aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, provenientes de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros. Além de telhas e demais objetos que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A resolução determina que os resíduos da construção civil não podem ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei, devendo ser adequadamente destinados como pode ser visto logo abaixo.

Quanto aos Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, estes devem contemplar as seguintes etapas:

I – caracterização: nesta etapa o gerador deve identificar e quantificar os resíduos;

II – triagem: deve ser realizada preferencialmente pelo gerador na origem ou ser realizada nas áreas de destinação licenciadas para essa finalidade, respeitadas as classes de resíduos;

III – acondicionamento: o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando, em todos os casos em que sejam possíveis, as condições de reutilização e de reciclagem;

IV – transporte: deve ser realizado em conformidade com as etapas anteriores e de acordo com as normas técnicas vigentes para o transporte de resíduos;

V – destinação: deve ser prevista de acordo com o estabelecido na resolução.

Após triagem, os resíduos da construção civil devem ser destinados das seguintes formas:

I Classe A – devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;

II Classe B – devem ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

III Classe C – devem ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

IV Classe D – devem ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Por fim, a resolução afirma que o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, em consonância com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, deve servir como um instrumento para a implementação da gestão dos resíduos da construção civil.

4. Propostas de Metodologias para Avaliação da Estabilização/Solidificação (Encapsulação) de Resíduos Industriais para Uso em Matrizes Cimentícias, Poliméricas e Cerâmicas e para Desenvolvimento de Produtos para a Construção Civil

A solidificação/estabilização de resíduos sólidos é um processo também conhecido por encapsulação ou fixação. Trata-se de uma tecnologia alternativa aos processos tradicionais de tratamento de resíduos e serve, principalmente, como um meio de facilitar o manuseio, o transporte e o armazenamento de resíduos. Em síntese, consiste em estabilizar química e/ou fisicamente os resíduos sólidos através da adição de aglomerantes ou da inserção em invólucros eficientes (PABLOS, 2008).

De acordo com Cláudio (1987), o termo encapsulação significa o processo usado para fixar, imobilizar ou restringir a capacidade de solubilização de um resíduo, reduzindo a sua toxicidade ao meio ambiente. Conforme Poon *et al.* (1986) esse processo é um pré-tratamento que induz reações químicas e mecanismos físicos para fixarem elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis.

Estabilização remete às técnicas de minimizar as periculosidades potenciais de um resíduo, reduzindo ao máximo a solubilidade, mobilidade e toxicidade dos contaminantes sem, necessariamente, alterar a natureza física do resíduo.

Solidificação, por sua vez, está relacionada às técnicas de encapsulação do resíduo em um sólido monolítico com elevada integridade estrutural. O processo nem sempre envolve algum tipo de interação química entre os resíduos e os reagentes dos materiais aglomerantes adotados, mas deve blindar mecanicamente o resíduo dentro de uma estrutura sólida. Assim sendo, a mobilidade dos contaminantes se torna difícil, devido à escassez de área superficial exposta à lixiviação e pelo fato de os resíduos estarem isolados em cápsulas impermeáveis (CONNER e HOEFFNER, 1998).

4.1. Técnicas Desenvolvidas

Conforme Pablos (2008), existem diversas técnicas de estabilização/solidificação de resíduos sólidos. As principais técnicas são: à base de cimento,

à base de cal e materiais pozolânicos (exceto cimento), à base de polímeros orgânicos, à base de argilas, vitrificação, encapsulação em invólucro inerte e auto-solidificação.

A seguir, essas técnicas são apresentadas de forma resumida.

4.1.1. Técnica à Base de Materiais Pozolânicos

Pozolanas são materiais naturais ou artificiais que contém sílica ativa, formando silicatos de cálcio com propriedades aglomerantes na presença de água. Geralmente, os materiais pozolânicos usados no tratamento de resíduos são as cinzas volantes, poeiras de forno de cimento e escória de alto-forno, xistos calcinados, telhas e tijolos cerâmicos moídos, pedra-pomes e cinzas de carvão oriundas de termo-elétricas.

As principais vantagens dessa técnica são o baixo custo dos materiais empregados, disponíveis em grande escala, a falta de necessidade de equipamentos especiais no processo, e o conhecimento das reações envolvidas.

Contudo, existem algumas desvantagens, como a lentidão das reações e a baixa resistência mecânica do material solidificado.

4.1.2. Técnica à Base de Polímeros Orgânicos

A técnica de solidificação/estabilização bastante utilizada com polímeros orgânicos chama-se ureia-formaldeído. No processo, o resíduo é misturado com um pré-polímero e com catalisador (CETESB, 1985).

Normalmente, o material polimerizado não se mistura quimicamente com o resíduo, mas forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas. Com isso, existe o risco de contaminantes serem liberados caso o polímero se degrade ou se rompa. A reação de polimerização, além disso, libera gases tóxicos que exigem cuidados especiais durante a operação.

Em contrapartida, o material solidificado possui volume pequeno e massa específica baixa, em relação a outros processos, e a quantidade necessária de material solidificante é pequena (CLÁUDIO, 1987).

4.1.3. Técnica de Encapsulação em Invólucro Inerte

No processo de encapsulação em invólucro inerte, o resíduo é inicialmente prensado ou aglomerado e, posteriormente, envolvido por uma jaqueta ou

camisa de material inerte. Geralmente, esse material de revestimento é o polietileno, o qual está sujeito a danos quando exposto a temperaturas elevadas e raios ultravioletas.

A técnica garante segurança total contra lixiviação e solubilização de poluentes; porém, seu custo é alto em virtude da necessidade de equipamentos sofisticados e mão de obra especializada (CETESB, 1985).

4.1.4. Técnica de Vitrificação

Na tentativa de formar um vidro ou um mineral de silicato sintético, alguns experimentos são feitos combinando resíduos com sílica e fundindo a mistura.

Como o vidro e os silicatos cristalinos são lixiviados muito lentamente pela água, esse processo é considerado seguro no que diz respeito à disposição final de resíduos. Entretanto, são necessárias instalações semelhantes à de uma indústria de vidros para fazê-lo e consumo energético intensivo acima de 1350ºC para que a mistura resíduo-silicato seja fundida (CETESB, 1985).

4.1.5. Técnica de Auto Solidificação

Resíduos industriais como lodos de limpeza de exaustão ou dessulfurização contêm grandes quantidades de sulfeto ou sulfato de cálcio, e quando calcinados apresentam propriedades aglomerantes.

Neste caso, a autossolidificação é possível, calcinando-se uma pequena porção do lodo (em torno de 8 a 10% do total) sob condições cuidadosamente controladas para produzir o aglomerante. O resíduo calcinado é misturado ao restante do lodo, juntamente com alguns aditivos, promovendo uma solidificação geral.

O material resultante é muito resistente, de baixa permeabilidade e com boa retenção de metais pesados presentes no resíduo. As desvantagens dessa técnica consistem na necessidade de equipamentos especiais e de energia adicional para gerar a calcinação (CETESB, 1985).

4.1.6. Técnica à Base de Argilas

As argilas bentonitas são as mais utilizadas nessa técnica. Dessa forma, as argilas bentonitas sódicas quando adicionadas de sais quaternários de amônia são transformadas em argilas organofílicas que, por sua vez, são

associadas ao cimento para que interajam com os compostos orgânicos dos resíduos, garantam sua fixação através da troca da amônia pelos compostos orgânicos e os impeçam de interferir no processo de hidratação do cimento (WARREN *et al.*, 1986).

4.1.7. Técnica à Base de Cimento Portland

Em se tratando de estabilização/solidificação de resíduos, o termo *matriz* significa a estrutura básica na qual os resíduos são fixados química e/ou fisicamente. Devido à simplicidade do processo e ao baixo custo, a fixação de resíduos perigosos em matrizes de cimento Portland é a técnica de estabilização/solidificação mais empregada. Essa técnica é especialmente indicada para resíduos metálicos (DANIALI, 1990).

A Tabela 7 mostra a compatibilidade de alguns resíduos com o processo de estabilização/solidificação em cimento.

Tabela 7 Exemplos de aplicação da técnica de estabilização/solidificação em matrizes de cimento. Fonte: Saito *et. al*, 1985, *apud* Hanna, 1996.

Indústria/Atividade	Tipo de Resíduo	Poluente
Galvanoplastia	Torta, lama	Cr, Pb, Cu, Ni, Zn
Galvanoplastia	Torta, lama	Zn
Componentes eletrônicos	Torta, lama	C, Sn, Pb
Químicos orgânicos	Líquido	Pb, Ti
Lavagem de gases	Líquido	Sulfatos alcalinos
Catálise petroquímica	Sólido	Co, Mo, Ni
Tratamentos metálicos	Líquido	Zn, Mg, Ba, ácidos
Farmacêutica	Torta, lama	Zn, Hg, Ba, Be
Acabamento metálico	Sólido	Cu, Ni, Zn
Incineração	Torta, lama	Mn, Fe, Pb, Zn, V
Decapagem ácida	Torta, lama	Cr, Zn, Fe, ácidos
Acabamento de Al	Torta, lama	Cr, Cu, ácidos

Segundo Pablos (2008), como os metais não podem ser destruídos por incineração, as alternativas de tratamentos para resíduos contendo metais tornam-se limitadas. Por isso, a técnica de estabilização/solidificação é considerada a melhor forma de disposição viável atualmente para esse tipo de resíduo.

De acordo com Mackay e Emery (1992), durante a hidratação do cimento são formados de 20 a 30% de hidróxido de cálcio, formando uma solução sólida nos poros com pH em torno de 12 a 13. Esse meio alcalino favorece a formação de compostos insolúveis, como hidróxidos e silicatos de metálicos.

Conforme Pablos (2008), são várias as vantagens de se utilizar a técnica de estabilização/solidificação à base de cimento Portland:

- os custos referentes ao cimento Portland e aos equipamentos necessários são relativamente baratos e o consumo de energia é baixo;
- existe um conhecimento bastante difundido a respeito dessa tecnologia, do controle da mistura e de seu manuseio;
- não é necessário secar e desidratar o resíduo, uma vez que será adicionada uma quantia de água para a hidratação do cimento;
- a mistura tolera diversas variações químicas, devido à alcalinidade do cimento, que propicia a neutralização de ácidos, e o protege da ação de oxidantes fortes, como os nitratos;
- permite originar produtos finais com a resistência mecânica e a permeabilidade desejadas;
- com a aplicação de um revestimento selante é possível melhorar as questões de lixiviação e solubilização do produto final;
- é possível tratar os resíduos no próprio local onde foram indevidamente depositados.

Por outro lado, de acordo com CETESB (1985), existem algumas desvantagens para essa técnica:

- o grande consumo de cimento;
- a massa e o volume do produto final geralmente são o dobro em relação a outros processos de fixação;
- a possibilidade da formação de amônia, devido à alcalinidade do cimento;
- a necessidade de aterros industriais para a disposição dos produtos finais não revestidos;
- a necessidade de um pré-tratamento com o uso de cimentos especiais e aditivos de custo elevado, quando os resíduos contêm grandes quantias de impurezas, as quais podem prejudicar o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento, tais como boratos e sulfatos.

Com base nas informações acima, elaborou-se a tabela a seguir, a fim de possibilitar uma breve comparação entre as diversas técnicas de estabilização/solidificação de resíduos, no que diz respeito às suas vantagens e desvantagens.

Tabela 8 Principais técnicas de estabilização/solidificação de resíduos.

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Materiais pozolânicos	Baixo custo Materiais disponíveis em grande escala Não necessita de equipamentos especiais Conhecimento das reações ocasionadas	Lentidão das reações Material solidificado tem baixa resistência mecânica
Polímeros orgânicos	Material solidificado possui volume pequeno e massa específica baixa Quantidade necessária de material solidificante é pequena	Risco de contaminantes serem liberados caso o polímero se degrade ou se rompa Reação de polimerização libera gases tóxicos
Encapsulação em invólucro inerte	Segurança total contra lixiviação e solubilização	Necessidade de equipamentos sofisticados e mão de obra especializada Custo elevado O material de revestimento, geralmente o polietileno, sofre danos em temperaturas elevadas e raios ultravioleta
Vitrificação	Processo seguro (lixiviação ocorre muito lentamente pela água)	Necessidade de instalações semelhantes à de uma indústria de vidros Consumo energético elevado Custo elevado
Auto-solidificação	Material resultante muito resistente Baixa permeabilidade Boa retenção de metais pesados	Necessidade de equipamentos especiais Consumo energético elevado
Cimento Portland	Simplicidade do processo Baixo custo Baixo consumo energético Domínio da tecnologia Não é necessário secar e desidratar o resíduo Compatível a diversas variações químicas Origina produtos finais com a resistência mecânica e a permeabilidade desejadas Possibilita tratar os resíduos no próprio local onde foram depositados	Necessita de um revestimento selante para melhorar as questões de lixiviação e solubilização do produto final Consumo de cimento elevado Produto final com grande volume e massa específica alta Pode gerar amônia Necessidade de pré-tratamento com o uso de cimentos especiais e aditivos de custo elevado, quando os resíduos contém grandes quantias de impurezas

5. Proposição de Protocolo para Análise dos Impactos Ambientais e para a (re) Reutilização de Resíduos Gerados a Partir de Demolição de Sistemas Construtivos com Resíduos Industriais Incorporados

Para analisar os possíveis impactos ambientais causados pelo descarte de resíduos de construção e demolição que contenham resíduos industriais incorporados é necessário realizar ensaios de lixiviação e solubilização em amostras desses materiais. Assim, os resultados dos ensaios indicarão, através da NBR 10004, se os resíduos apresentam periculosidade ou são contaminantes para o meio ambiente.

Da mesma maneira, para a (re) reutilização de resíduos gerados a partir da demolição de sistemas construtivos com resíduos industriais incorporados, a realização dos ensaios de lixiviação e solubilização se faz obrigatória, assim como a classificação destes resíduos usando-se a NBR 10004.

Isso quer dizer que sempre, para que resíduos industriais sejam incorporados em materiais ou componentes para a construção civil, ou que resíduos de construção e demolição que contenham resíduos industriais incorporados sejam reutilizados, deve-se seguir o seguinte protocolo:

- realizar ensaios de lixiviação e solubilização em amostras dos resíduos, segundo a NBR 10005 e a NBR 10006;
- classificar os resíduos segundo a NBR 10004;
- eleger uma técnica de estabilização/solidificação para reutilizar esses resíduos;
- realizar ensaios de lixiviação e solubilização em amostras do produto gerado, segundo a NBR 10005 e a NBR 10006, para checar a estabilização dos resíduos incorporados.

Devido à possibilidade de os resíduos industriais serem perigosos ou contaminantes, torna-se extremamente importante a fiscalização do processo de reutilização destes na construção civil; o que deve ser feito apenas em usinas de reciclagem de materiais de construção, como se mostra na Figura 6, ou em indústrias devidamente capacitadas e segundo os procedimentos descritos acima, fazendo-se sempre os ensaios de lixiviação e solubilização nos resíduos, para a sua correta classificação e forma de reutilização.





Figura 6. Usina de reciclagem de materiais de construção em São Carlos – SP. Autor: Gerusa Salado.

Os resíduos da construção e demolição devem ser separados por tipo (madeira, concreto, aço, vidro etc) e destinados à devida reutilização ou reciclagem, podendo gerar diversos novos elementos – Figura 7.



Figura 7. Elementos produzidos em usina de reciclagem de materiais de construção em São Carlos – SP. Autor: Gerusa Salado.

Após a etapa de classificação, os resíduos podem ser reincorporados em materiais e componentes para a construção civil quantas vezes se desejar, desde que sempre seguindo os procedimentos e ensaios descritos acima.

6. Conclusões

Cada brasileiro gera, em média, 1,0 kg de resíduo por dia: mais que um africano, menos que um europeu. Isso mostra que quanto maior a renda de um país, maiores são o consumo e a quantidade de resíduos que precisa de solução para voltar ao mercado e não impactar negativamente o meio ambiente.

Com o desenvolvimento econômico, a tendência é o padrão brasileiro se aproximar do americano e do europeu, o que significa novos desafios para a gestão dos resíduos. A legislação estabelece, como prioridade, reduzir o lixo na fonte e depois reutilizar e reciclar.

Além do poder público e das empresas, o comportamento da população é fundamental para a expansão do mercado da reciclagem. O governo tem o dever de criar regras e incentivos à essa prática, as prefeituras de fazer a coleta seletiva, e o meio empresarial de investir em logística reversa. A população, por sua vez, deve agir conscientemente, separando os resíduos para a coleta seletiva e exercendo o seu poder de compra, optando por produtos reciclados.

Nota-se que as mudanças ainda são lentas na diminuição do potencial poluidor do parque industrial brasileiro, principalmente no tocante às indústrias mais antigas, que continuam contribuindo com a maior parcela da carga poluidora gerada e elevado risco de acidentes ambientais, sendo necessários altos investimentos de controle ambiental e custos de despoluição para controlar a emissão de poluentes, o lançamento de efluentes e o depósito irregular de resíduos perigosos.

Os custos das empresas em proteção ambiental, incluindo redução da poluição, gestão de resíduos, monitoramento, conformidade, impostos e seguros, têm aumentado rapidamente nos últimos anos, com regulamentação ambiental crescente e mais exigente.

Por fim, ressalta-se que da mesma forma que os resíduos sólidos em geral (comuns e industriais) não podem ser descartados sem tratamento adequado e de maneira aleatória no meio ambiente, os restos de construção e demolição que contenham resíduos industriais incorporados também devem ter uma destinação final ambientalmente adequada. Mas, para isso, é imprescindível o controle e a fiscalização de todo o processo pelos órgãos governamentais.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA BRASIL. *Tratamento de resíduos industriais no Brasil dobra em três anos*. Publicado em 04/06/2009. Disponível em: <http://www.ecodesenvolvimento.org.br/noticias/tratamento-de-residuos-industriais-no-brasil-dobra. Acesso em: 18 de fev. 2012>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Abelpre). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2014.* Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 28 de jul. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.004 – Resíduos sólidos – Classificação.* Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro, 2004c.

BANCO MUNDIAL (World Bank). Hoornweg, D.; Bhada-Tata, P. (Org.). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank: Washington, DC (EUA), 2012.

BRASIL (País) Ministério do meio Ambiente. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>. Acesso em 31 de jul. 2015.

CASAGRANDE JR, E. F. Inovação e sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. *Revista Educação e Tecnologia*. Núcleo de Gestão Tecnológica da Universidade Federal do Paraná: Paraná 2004.

CIMM. *O destino certo dos resíduos industriais.* Publicado em 09/04/2010. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6788-o-destino-certo-dos-resduos-industriais>. Acesso em: 18 de fev.2012.

CLÁUDIO, J. R. *Resíduos sólidos perigosos – solidificação de lamas tóxicas com cimentos.* Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Resíduos Sólidos Industriais.* 1985.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. *Cempre Review 2013*. Cempre: São Paulo, 2013.

CONNER, J. R.; HOEFFNER, S. L. The history of stabilization/solidification technology. *Critical Reviews in Environment Science and Technology*, EUA, p. 325-396, 1998.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução nº 307*. De 05 de julho de 2002.

DANIALI, S. Solidification/stabilization of heavy metals in latex modified Portland cement matrices. *Journal of Hazardous Materials*, v. 24, n. 2-3, p. 225-230, 1990.

EDWARDS, B. *Guía básica de la sostenibilidad.* Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

FEDERAÇÃO DAS INDÙSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). *Política Nacional de Resíduos Sólidos: Lei 12.305/2010 – Decreto 7.404/2010.* Apresentação (Power point). Novembro de 2011. Disponível em: http://www.fiesp.com.br/arquivos/2011/arquivos/pnrs_e_decreto.pdf. Acesso em: 17 de jan. 2012a.

FEDERAÇÃO DAS INDÙSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). *Resíduos Sólidos.* Disponível em: <http://www.fiesp.com.br/ambiente/area_tematicas/residuos.aspx>. Acesso em: 18 de fev. 2012b.

HANNA, R. A. *Estudo da estabilização por solidificação de produtos tóxicos em cimento Portland: uma análise em nível microestrutural.* Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KIPERSTOCK, A. Tendências ambientais do setor automotivo: prevenção da poluição e oportunidade de negócio. *Revista Nexus, Curso de mestrado em Economia da Universidade Federal da Bahia*, setembro 2000.

KRAEMER, M. E. P. *A questão ambiental e os resíduos industriais. 2012b.* Disponível em: http://br.monografias.com/trabalhos/residuos-industriais/residuos-industriais.shtml. Acesso em 18 de fev. 2012.

KRAEMER, M. E. P. *Como quantificar e contabilizar os resíduos industriais. 2012a.* Disponível em: <http://br.monografias.com/trabalhos/quantificar-residuos/quantificar-residuos.shtml>. Acesso em 18 de fev. 2012.

MACKAY, M.; EMERY, J. Stabilization/solidification of contamined soils and sludges using cimentitious systems. *Cement Industry Solutions to Waste Management Proceedings*, Calgary, p. 135, 1992.

PABLOS, J. M. *Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil.* Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

POON, C. S.; CLARK, A. I.; PERRY, R. Permeability study on the cement based solidification for the disposal of hazardous wastes. *Cement and Concrete Reseach*, EUA, v. 16, p. 161-172, 1986.

ROGERS, D.; TIBBEN-LEMBKE, R. An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logisticis*, v. 22, n. 2, p. 129-148, 2001.

ROOM, J.J.; KOSELKA, P. R.; ALVARES JR, M. *Empresas eco-eficientes.* São Paulo: Editora Signus, 2004.

SANCHES, L. E. *Desengenharia: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais.* São Paulo: Editora Edusp, 2001.

SARTOR, C. E.; LAMBERTS, R. *Habitare : resultados de impacto 1995/2007.* Florianópolis: Coan Impressão Gráfica, 2008.

SMART CITIES (Revista). *UE gera menos resíduos*. Medialine: Lisboa (Portugal). Disponível em <http://www.smart-cities.pt/pt/noticia/ue-gera-menos-residuos-2603>. Acesso em: 28 de jul. 2015.

WARREN, D. S.; CLARK, A. I.; PERRY, R. A review of clay-aromatic interactions with a view to their use in hazardous waste disposal. *Science Total Environment*, v. 54, p. 157, 1986.

WORLD COMISSION ON ENVIRONMENTO AND DEVELOPMENT. *Our commom future.* Oxford Backpapers, 2007.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C003

Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização

3

Marlova Piva Kulakowski
Feliciane Andrade Brehm
Claudio de Souza Kazmierczak
Elenize Ferreira Maciel
Mariele Lunckes

1. Introdução

Os avanços no uso de resíduos sólidos como fontes de matéria-prima na construção civil têm permitido, cada vez mais, reverter futuros passivos ambientais em produtos com valor agregado, de forma a reduzir custos e prejuízos ambientais relativos à disposição final, além de minimizar os impactos ambientais decorrentes da extração de matérias-primas diretamente do meio ambiente. Essa tendência mundial está fazendo crescer a indústria da reciclagem, que, por sua vez, demanda pesquisas e estudos que avaliem e garantam o processo de reaproveitamento e/ou reciclagem dos resíduos em todos os aspectos, desde o técnico, passando pelo econômico até o de segurança ambiental. Entre os aspectos vinculados à avaliação ambiental de materiais de construção civil que incorporam resíduos, encontram-se aqueles que se referem à interação com o meio ambiente durante a sua exposição às intempéries. Este capítulo apresenta conceitos e métodos de avaliação ambiental quanto à estabilização por solidificação de materiais e componentes de construção civil, bem como a proposta de um método para a obtenção de extrato lixiviado, desenvolvido no âmbito da Rede de Cooperação em Pesquisa INOVATEC.

1.1. Avaliação Ambiental

A avaliação do impacto ambiental de produtos e sistemas é uma avaliação ampla, que contempla desde os aspectos vinculados à extração de matéria prima, transporte, processamento, uso, manutenção e descarte ou reciclagem, considerando as questões de emissões de gases de efeito estufa, consumo energético e energia incorporada, até a interação com o meio ambiente a partir da sua exposição às intempéries.

Em um aspecto mais restrito da avaliação ambiental, é a composição química que pode indicar o grau de periculosidade e de toxicidade de um produto. E, visto que a interação direta com o meio ambiente, por meio da exposição às intempéries, pode levar à lixiviação de compostos que, conforme o seu caráter químico e em determinados teores, pode levar à contaminação para o solo e cursos d'água, a avaliação da estabilidade química e física dos produtos torna-se um ponto importante nesse tipo de análise.

1.2. Avaliação Ambiental de Materiais e Componentes de Construção Civil

Os sistemas construtivos empregados na edificação de habitações e de bens imóveis utilizados para outros fins são complexos, pois, em geral, incorporam uma infinidade de materiais oriundos de diversas fontes. O processamento desses materiais e componentes, além disso, pode demandar uma quantidade de energia considerável, assim como volumes significativos de recursos naturais.

Para enfrentar a crescente lista de problemas de desempenho ambiental das construções, cada vez mais, são necessárias as avaliações de fluxo de materiais e ambientais. A análise de fluxo de massa, energia e carbono, envolvidos na obtenção de produtos, a partir da exploração de recursos naturais como, por exemplo, aqueles oriundos de floresta ou de mineração a céu aberto, bem como a sua destinação final em aterros ou reciclagem, é uma tarefa complexa. Na construção de habitações com materiais alternativos, como é o caso daquela que emprega resíduos, as tentativas para determinar o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida são sobrecarregadas pela grande quantidade de dados que exigem.

Assim, ao mesmo tempo em que o emprego de resíduos para a produção de materiais e componentes construtivos pode melhorar a sustentabilidade do sistema, pelo fato de poupar os recursos naturais, a necessidade de uma

avaliação da interação desses produtos com o meio ambiente de forma segura pode ser um entrave para o uso de recursos alternativos na construção civil.

Especificamente, as edificações encontram-se, em sua totalidade, em contato direto com o meio ambiente e, ao exercer a função de proteção e conforto do morador, estão diretamente expostas às intempéries, sujeitas à ação de raios solares, ventos, chuvas e alagamentos, os quais podem levá-las ao desgaste e a à degradação. O invólucro de uma edificação, que pode ser constituído por elementos de estrutura e vedação, como fachada e cobertura, recebe a ação direta da água da chuva ou de alagamentos, os quais podem, em algum momento, carrear compostos para o solo e cursos d'água. Esse processo é o que se denomina como lixiviação.

2. Lixiviação (e Solubilização)

2.1. Conceitos e Terminologias

Por se tratar de um tema multidisciplinar, faz-se necessário esclarecer a terminologia adotada na área de avaliação ambiental, conforme segue:

Adsorção – aumento na concentração de um determinado elemento na superfície ou na interface entre duas fases. O material que está sendo concentrado ou adsorvido é denominado adsorbato e a fase que o adsorve é denominada adsorvente (PETRONI, 2004).

Caracterização ambiental – processo de caracterização, no qual a composição de diversos fluxos de resíduos é analisado e classificado. A caracterização tem um papel importante em qualquer tratamento de resíduos, sendo, por isso, uma ferramenta essencial no âmbito da gestão integrada de resíduos sólidos (CRUZ, 2005).

Classificação ambiental – metodologia que envolve a identificação do processo ou da atividade que deu origem aos resíduos, bem como a de seus constituintes e características, além da comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e meio ambiente é conhecido (ABNT, 2004b, p. 2).

Fluído percolante – líquido com potencial de dispersibilidade, normalmente água. Segundo a NBR 9575:2010, é a água que atua sobre superfícies, não exercendo pressão hidrostática superior a 1 kPa (ABNT, 2010, p. 2);

Lixiviação – capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator (ABNT, 2004a, p. 1);

Lixiviado – extrato obtido a partir do ensaio de lixiviação (ABNT, 2004a);

Solubilização – operação que tem o objetivo de diluir substâncias contidas nos resíduos, por meio de lavagem em meio aquoso. Na E/S a solubilização dos contaminantes é caracterizada segundo sua transferência para o meio líquido (ABNT, 2004);

Solução Lixiviante – fluído percolante utilizado em qualquer extração ou solubilização seletiva dos constituintes químicos de um material (WINGE, 2015);

Com a finalidade de manter a clareza dos termos definidos anteriormente, os quais serão empregados ao longo deste capítulo, merece destaque o caso da diferença entre os conceitos lixiviação e solubilização. Embora não esteja explícito no conceito de lixiviação estabelecido pela norma ambiental brasileira de lixiviação de resíduos NBR 10.005, a extração dos constituintes químicos dos resíduos é realizada com o emprego de um fluído percolante com característica ácida (ABNT, 2004). Em outros países, tanto a extração com ácido, como com água é tratada por lixiviação. Na área da Patologia das Construções, por sua vez, lixiviação é tomada como o processo que, após a exposição a um fluido líquido, carreiam para a superfície do componente sais solúveis, tendo como produto a eflorescência. Na avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos, toma-se por lixiviação o processo de extração de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes em monólitos, por meio da dissolução no meio extrator, que pode ser uma solução ácida ou aquosa.

2.2. Estabilização por Solidificação

A origem dos atuais processos de estabilização e solidificação de resíduos, de acordo com Conner e Hoeffner (1998), encontra-se em quatro principais áreas da tecnologia, que vêm sendo praticadas há muitos anos, como:

- Solidificação e disposição de resíduos radioativos;
- Estabilização do material escavado das minas e os seus rejeitos;
- Estabilização dos solos instáveis, controlando a infiltração para fins de construção;

- Uso de resíduos sólidos para construção de base para estradas e áreas de loteamento.

Os processos de estabilização por solidificação E/S foram primeiramente empregados em meados da década de 70, para tratar alguns resíduos provenientes da indústria do aço. Utilizava-se cal para neutralizar a acidez e cinza volante, solo ou cimento Portland para produção de um sólido que pudesse ser descartado em aterros. Nessa época não havia muito controle ambiental, esses processos eram comuns e o tratamento normalmente era feito em batelada, sem padrões e com processos ineficientes. A intenção ao realizar o tratamento era somente a neutralização dos ácidos, para que os aterros recebessem o resíduo. Com o passar do tempo, outros tipos de resíduos passaram a ser incorporados aos produtos estabilizados/solidificados, como lodos resultantes de indústrias metalúrgicas ou siderúrgicas e, com isso, a E/S tornou-se cada vez mais complexa. Dessa forma, surgiu a necessidade de se elaborar métodos que testassem esses produtos e de propor parâmetros de análise, a fim de estabelecer limites de lixiviação, de forma a garantir a minimização de impactos ambientais no solo e água (CONNER; HOEFFNER, 1998).

É possível definir a estabilização por solidificação de resíduos sólidos como uma técnica empregada para o tratamento e disposição dos resíduos sólidos e consiste em imobilizar o resíduo dentro de uma matriz solidificada, com grande integridade estrutural, que garanta que o resíduo permaneça fixo mecanicamente em sua microestrutura, podendo ou não ocorrer interação química (PINTO, 2005). A matriz deve apresentar boa resistência mecânica, estabilidade química e física e boa resistência a temperaturas elevadas (CASTRO, 2010), e deve impedir a migração e exposição de contaminantes no ambiente (U.S EPA, 2009). A matriz solidificada para promover a E/S consiste em misturar agentes ligantes, orgânicos ou inorgânicos, com resíduos, convertendo-os em um material monolítico com permeabilidade muito baixa, no qual os constituintes dos resíduos ficam imobilizados (STEGEMANN e CÔTÉ, 1996).

Segundo Wiles (1987) e Brito (2007), a solidificação pode ser definida como um processo em que o resíduo é encapsulado, formando um material sólido, podendo não envolver interações químicas entre contaminantes e aglomerantes. Por sua vez, a estabilização se refere ao processo em que o contaminante fica total ou parcialmente encapsulado, convertendo-se em

um formato mais estável quimicamente, dando condições para minimizar a solubilidade, mobilidade e periculosidade dos componentes presentes no material, podendo ou não ocorrer modificação nas características físicas dos resíduos.

Dessa forma, a E/S pode ser entendida como duas etapas que se completam e que ocorrem no momento em que os agentes aglomerantes entram em contato com os contaminantes e resíduos, sendo então aprisionados quando fixados na matriz, reduzindo sua migração para o meio ambiente. Entre os agentes aglomerantes destacam-se o cimento Portland, o hidróxido de cálcio (cal hidratada), o asfalto, as argilas, o polietileno e outros polímeros orgânicos (BRITO, 2007).

Segundo Stegemann e Buenfeld (2002), o processo de E/S com cimento Portland, cerâmicas, polímeros ou vidros é frequentemente sugerido como um dos melhores tratamentos para contaminantes que não podem ser reduzidos ou reciclados, além de incluir modificações na solubilidade, em função do controle de pH, formação de estruturas químicas insolúveis e encapsulamento. A aplicação da E/S pode ocorrer em resíduos provenientes de indústrias, como a metalúrgica, a química e a petroquímica, incluindo cinzas resultantes da queima de biomassa, lodo proveniente de tratamento de águas residuais ou refino de metais, resíduos de galvanoplastia e resíduos de energia nuclear (ROSA, 2001). A técnica de E/S, ainda, apresenta mecanismos que inibem a dispersão dos contaminantes, também modificando a solubilidade, por controlar o pH, formando combinações químicas insolúveis e encapsulamento dos contaminantes. Consequentemente, as vantagens da técnica de E/S estendem-se para benefícios ambientais, uma vez que evitam passivos ambientais, reduzindo, com isso, prejuízos ambientais relativos à disposição final e minimizando os impactos ambientais negativos decorrentes da extração de matérias-primas diretamente do ambiente.

2.3. Estabilidade de Resíduos Incorporados a Materiais de Construção

O setor da construção civil, na produção de edificações e obras de infraestrutura, consome grandes volumes de recursos naturais e energia. Entre os materiais mais consumidos pelo setor encontram-se o cimento e a cerâmica vermelha. Em 2013, conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), o consumo nacional de cimento foi de 71 milhões

de toneladas, representando um consumo *per capita* de 353 kg/hab./ano. No segmento da cerâmica vermelha, o consumo de argila é na ordem de 10,3 milhões de toneladas ao mês, e o consumo *per capita* de blocos e telhas é em torno de 396 peça/hab./ano (ANICER, 2012).

A reciclagem de resíduos em materiais de construção civil traz vários benefícios ambientais, entre eles, a destinação final por meio da estabilização/solidificação e a diminuição do consumo de recursos naturais não renováveis. Em alguns casos pode-se, inclusive, melhorar o desempenho dos materiais com a incorporação do resíduo.

2.3.1. Estabilização em Matriz de Cerâmica Vermelha

Uma alternativa como matriz para E/S é a cerâmica vermelha como agente fixador no encapsulamento de resíduos. A matéria-prima para a cerâmica vermelha é uma composição de argilominerais, que são sinterizados em temperaturas médias, na ordem de 800 a 1.100°C. A qualidade dessa matriz como agente fixador dependerá da própria qualidade da cerâmica (HEREK et al., 2012), que, por sua vez, depende, entre outros fatores, da composição da argila, da velocidade de perda de água na secagem, da temperatura de queima, da taxa de aquecimento do forno, do patamar de temperatura máxima, do tempo de permanência no patamar máximo, da velocidade de resfriamento, além da uniformidade da temperatura dentro do forno (KAZMIERCZAK, 2010). Esses fatores determinarão a qualidade da microestrutura do material e seu grau de fragilidade. Por exemplo, uma secagem não uniforme, em função de uma rápida perda de água, pode acarretar em fissuras; baixas temperaturas de queima podem gerar uma matriz mais porosa, com baixa capacidade de fixação do resíduo. Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água desenvolvem uma série de propriedades, tais como, plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, entre outras, que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas, entre elas, o uso para a incorporação de resíduos (MARANGON, 2008).

O emprego de argila para E/S de resíduos pode ter como produto final materiais cerâmicos de valor agregado, mostrando-se, dessa forma, um processo promissor. O processo de incorporação de resíduos em material cerâmico pode ser inicialmente explicado pelas propriedades da argila. Tanto Morais e Sposto (2006), como Castro (2008) e Monteiro (2009), afirmam que todos os tipos de argilas são constituídos de argilominerais, os quais são compostos

quimicamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, contendo ainda certo teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, potássio e sódio e também de oxigênio. Além dos argilominerais, as argilas contêm geralmente matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais. Em geral, a argila possui um diâmetro de partículas menor do que 2 µm, consequentemente, apresenta uma grande área de superfície específica (ASE), aumentando de forma acentuada sua reatividade (MEURER, 2004).

As partículas coloidais das argilas silicatadas, denominadas micelas (micro células), possuem, em geral, carga negativa. Por conseguinte, cada cristal do coloide atrai íons com carga positiva (por exemplo, H^+, Al^{3+}, Ca^{2+} e Mg^{2+}), o que ocasiona aquilo que é conhecido como dupla camada iônica (McBRIDE, 1994). Assim, uma partícula de argila pode ser acompanhada por cátions, que são adsorvidos ou retidos pelas partículas de superfície. Dessa forma, a hipótese de que esse tipo de matriz possa encapsular uma parcela significativa dos cátions presentes no lodo pode levar à adoção de cerâmica vermelha como uma das matrizes a ser considerada para o encapsulamento de resíduos, em especial os lodos.

Argilominerais do tipo 2:1, que é o caso da ilita, da esmectita, da vermiculita, entre outros, podem demonstrar uma grande potencialidade na remoção de íons, exercendo fundamental importância na E/S de metais metálicos (CHUI, 2005; FONSECA et al., 2006; ABOLLINO, 2008). Porém os argilominerais do tipo 1:1, como exemplo da caulinita, pouco contribuem para a adsorção de íons metálicos (FERREIRA, 2008). A Figura 1 retrata as características da estrutura dos argilominerais ilita e caulinita.

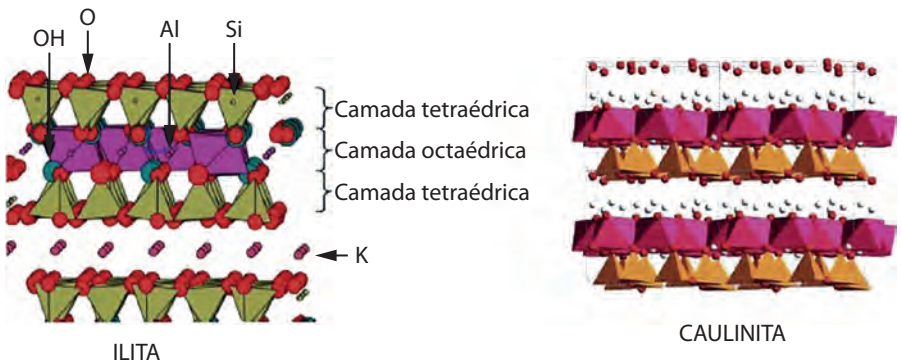


Figura 1. Estrutura dos argilominerais: ilita e caulinita. *Fonte*: Ferreira (2008).

As substituições isomórficas nas folhas tetraédricas da ilita (Figura 1) resultam em uma elevada carga negativa, gerando um excesso de cargas que é neutralizado pela presença de potássio (K) no espaço interlamelar da estrutura, impedindo a entrada de água e também de cátions (FERREIRA, 2008). As cargas da superfície externa da ilita, porém, podem ser trocadas por outros cátions (PUREZA, 2004). Consequentemente, íons metálicos como os de Cr^{3+} podem ser adsorvidos na superfície destas estruturas.

Analisando a estrutura da caulinita na Figura 1, é possível perceber que as folhas tetraédricas, representados em amarelo, estão unidas umas às outras por ligações covalentes, assim como as octaédricas, representadas em cor rosa. Os grupos hidroxilas (OH^-) de uma camada octaédrica se unem com os íons oxigênio (O^{2-}) da camada tetraédrica (representados por esferas vermelhas) por meio de pontes de hidrogênio, interações dipolares e forças de Van der Walls, resultando em uma forte ligação entre as camadas no plano de clivagem e diminuindo a capacidade de troca catiônica da superfície interna (FERREIRA, 2008).

Valverde (2001) afirma que a capacidade de adsorção, presente naturalmente em alguns tipos de argila, é propícia para a incorporação de resíduos inorgânicos e ainda pode ser melhorada consideravelmente através de modificações químicas simples, baseadas na capacidade de troca iônica dessas argilas, passando, assim, a serem chamadas comercialmente de CAM, iniciais de "complexo argilo-mineral". Isso faz com que os metais, encontrados na forma de íons, sejam adsorvidos pela argila em uso, porém, Verduch e Solana (2000) destacam que não necessariamente a adsorção garante a possibilidade de estes metais estarem completamente inertes.

Salienta-se que, no processo de E/S de resíduo inorgânico em argilas, o próprio processo térmico potencializa as reações químicas entre os resíduos e os demais componentes da argila (aglomerante) (MACHADO, 2005). É ao longo desse tratamento térmico que as matérias-primas sofrem alterações em sua composição química, na estrutura cristalina e na sua microestrutura. Os constituintes das massas cerâmicas que se apresentam estáveis à temperatura ambiente quando são levados a altas temperaturas sofrem reações e mudanças estruturais. Essas mudanças são fundamentais para a obtenção de estabilidade e das propriedades finais e úteis dos produtos. Figueiredo (2008) ressalta que, ao utilizar o tratamento térmico como medida para estabilização de materiais e principalmente de contaminantes em uma matriz sólida, é importante avaliar

o quão satisfatório ou não foi o processo, inclusive as emissões gasosas por ele geradas, as quais devem ser coletadas e tratadas, porém, concorda com Brito (2007), quando menciona que ainda não há uma regulamentação definindo o que fazer passo a passo, após um processo de solidificação e estabilização.

Como exemplo de trabalho que utilizou argila para retenção de contaminantes, pode ser citado o trabalho de Herek et al. (2011), os quais avaliaram a E/S de Lodo da Industria Têxtil em material cerâmico, Brehm et al. (2007), que realizaram a reciclagem de Lodo de Fosfatização em cerâmica vermelha e Ramos (2009), que avaliou a técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil, visando à produção de bloco cerâmico de vedação.

2.3.2. Estabilização em Matriz de Cimento Portland

Entre os aglomerantes já citados, o mais empregado é o cimento Portland, pois suas reações químicas são ativadas somente pela água (reações de hidratação), ocorrendo à temperatura ambiente e seu endurecimento (pega), que leva à formação de uma microestrutura sólida, realiza-se em algumas horas.

O emprego de cimento Portland em processos de E/S tem como objetivo minimizar a mobilidade dos poluentes, reduzindo os líquidos livres, encapsulando o resíduo, pela formação de um sólido monolítico que integra o resíduo, imobilizando os contaminantes. A constituição da matriz monolítica ocorre pela hidratação dos silicatos do cimento, formando silicatos de cálcio hidratado. Dos ligantes inorgânicos, o cimento Portland tem sido o mais aplicado em resíduos perigosos, sendo de uso essencial na técnica de E/S (CONNER, 1990; SILVA, 2007).

Segundo Conner (1990), os processos com incorporação de resíduos em cimento Portland podem apresentar vantagens e desvantagens.

Como vantagens têm-se disponibilidade de materiais; baixo custo de materiais e equipamentos para mistura; habilidade de formar barreira física mesmo em condições adversas; flexibilidade na forma das propriedades de acordo com a aplicação; composição de baixa variabilidade.

Por sua vez, pode-se citar, entre as desvantagens, que os produtos que apresentam porosidade podem permitir a lixiviação dos contaminantes quando não ocorrer fixação eficiente; o volume do resíduo pode aumentar em decorrência da adição do agente aglomerante; há necessidade de pesquisadores experientes para que a aplicação seja eficiente, mesmo que o processo pareça simples.

A Figura 2 ilustra o processo de E/S, uma vez que os contaminantes estejam retidos ou aprisionados no interior da partícula de cimento, e ocorrerem reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes ou processos de retenção física dos contaminantes. O chumbo (Pb^{2+}), cádmio (Cd^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) são precipitados na zona de superfície do composto hidratado, enquanto o cromo (Cr^{3+}) pode ser incorporado no interior do composto, especialmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que apresenta a fórmula molecular $CaO.2SiO_2.3H_2O$ (CONNER, 1990).

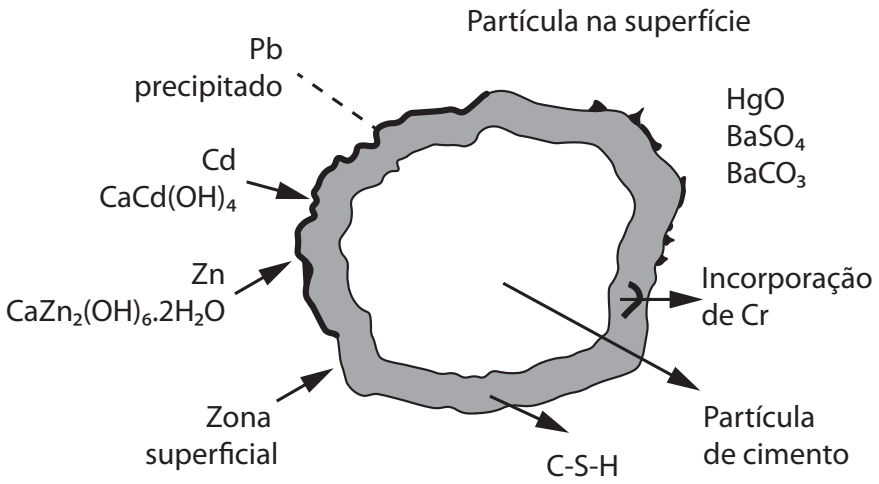


Figura 2. Esquema de E/S em matriz de cimento Portland. *Fonte*: Park (2000).

Segundo Conner (1990), quando se utiliza cimento Portland comum para E/S de resíduos sólidos industriais perigosos, o pH da matriz favorece a conversão de cátions em hidróxidos, óxido e carbonatos insolúveis, incorporando íons metálicos à estrutura cristalina da matriz de cimento. O óxido de mercúrio e os saís de Bário permanecem na superfície da partícula de cimento, pois com a elevação do pH os cátions de bário (Ba^{2+}) e mercúrio (Hg^{2+}) são convertidos para a forma de óxido (HgO) e carbonatos insolúveis ($BaSO_4$ e $BaCO_3$).

Outros íons presentes em determinados resíduos, como alguns lodos, também podem ser estabilizados pelos produtos de hidratação do cimento. Brehm et al. (2013) observaram que o sódio foi estabilizado tanto na matriz de cerâmica como na matriz de cimento Portland. Também os elementos Cu, Zn, Fe e Mn podem ser encapsulados nestas matrizes e, neste caso, o

comportamento pode ser explicado devido à capacidade dos minerais silicatados (presentes na argila e no cimento) em adsorver estes metais (SANCHEZ et al., 1999).

2.4. Mecanismos de Lixiviação

A lixiviação de constituinte de um sólido inicia-se por meio de uma dissolução na água do poro da matriz sólida ou na solução lixiviante que permeia o sólido (ROSA, 2001). Essa dissolução normalmente acontece como consequência de reações químicas, envolvendo a solubilização de partículas presentes na fase sólida para a água dos poros e seu transporte pelo lixiviante por intermédio da rede de conexão dos poros (ASAVAPISIT et al.,2001). Contudo, os mecanismos de lixiviação nem sempre são simples e normalmente, após a dissolução, a taxa de lixiviação é regulada por meio da difusão (GUZELLA, 2010).

A difusão é entendida como um fenômeno que explica o transporte de íons ou de moléculas de um meio sólido, líquido ou gasoso, a partir de locais de maior concentração para os de menor concentração. No caso do estudo da lixiviação de componentes de um resíduo que passou por processo de E/S, pode-se presumir que a movimentação dos componentes do sólido tende a ir para a solução lixiviante devido à diferença do potencial químico (concentração) existente entre o sólido e o líquido. A Figura 3 apresenta as etapas, de forma simplificada, do processo de lixiviação que se desenvolve a partir de um material sólido e uma solução lixiviante.

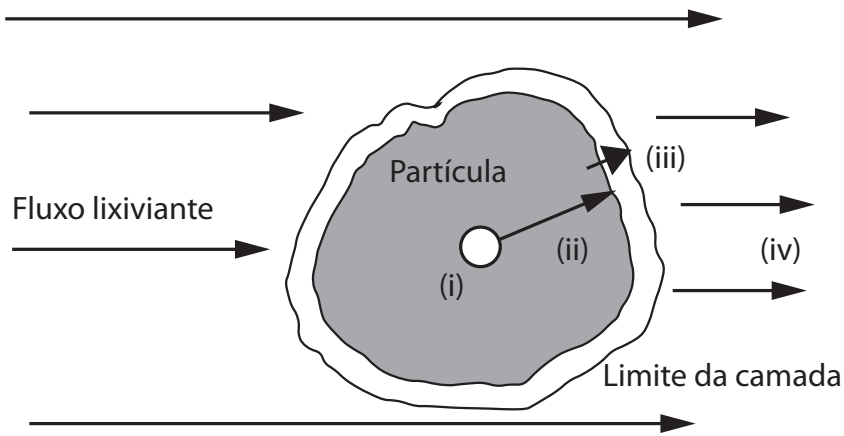


Figura 3. Etapas do mecanismo de lixiviação. *Fonte*: Cohen (1999).

As etapas ilustradas na Figura 3 são explicadas por Cohen (1999):

Em (i) é representada a primeira etapa da lixiviação, denominada reação. Nela, as espécies da fase sólida passam para a fase líquida através de mecanismos de dissolução de sais altamente solúveis, solubilização de fases sólidas minerais, controlada por meio do equilíbrio de solubilidade e pH, liberação da fase sólida por reação química ou complexação com reagentes dissolvidos, dessorção de espécies adsorvidas na superfície do sólido, troca iônica, etc. Normalmente os precipitados formados pelas reações químicas podem passivar resíduos das partículas, reduzindo a velocidade ou bloqueando completamente o transporte através do sólido ou da interface da camada limite por entupimento dos poros;

Em (ii) ocorre a etapa da difusão intrapartícula, na qual se observa o transporte para a fase líquida de espécies metálicas do local onde estão contidas para a superfície do sólido, por meio da porosidade;

Na etapa (iii) é observada a transferência de massa externa, em que há o transporte da superfície do sólido até a fase líquida;

Na etapa (iv), ocorre o movimento para fora do sólido na solução líquida através de difusão. Esta etapa recebe o nome de transporte no líquido.

Quando a solução lixiviante apenas entra em contato com o resíduo, de forma não interativa e sem pressão, a difusão pode ser caracterizada por uma lavagem superficial (Figura 4a). Porém, quando a solução lixiviante é forçada a entrar em contato com o resíduo, ocorre um fenômeno de difusão-dispersão também chamado de *flow-through*, o qual pode ser observado na Figura 4b (POON e CHEN 1999).

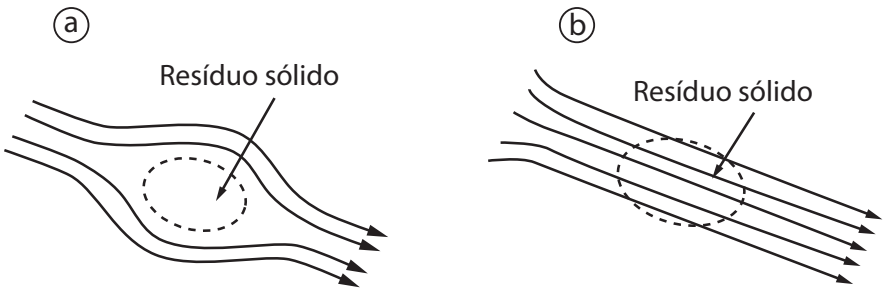


Figura 4. Regime do escoamento da solução lixiviante: (a) lavagem superficial (b) *flow-through*. *Fonte*: Poon e Chen (1999) apud Basegio (2004).

A diferença entre as duas formas de difusão está associada à diferença do regime de escoamento da solução lixiviante, conforme observado nas Figuras 4a e 4b. O transporte dos componentes dá-se em uma direção única no modelo *flow-through* e em todas as direções no modelo de lixiviação por lavagem superficial, sendo insignificante o efeito da dispersão.

Segundo Rosa (2001), os testes de lixiviação nos quais são empregadas modelagens *flow-through* são indicados para estudos do comportamento de resíduos solidificados, em função da habilidade dos mesmos em acelerar processos de lixiviação. Já a forma de lixiviação por lavagem superficial é muito utilizada para resíduos estabilizados considerados perigosos e ocorre quando um resíduo é menos permeável que o material no seu entorno. O movimento dos contaminantes se dá a partir da superfície da matriz sólida, criando um gradiente de concentração que vai do centro do resíduo até a interface do lixiviante, e o contaminante é difundido a partir do poro do resíduo que está saturado com a solução lixiviante.

Em materiais porosos a água pode penetrar por absorção capilar e, a seguir, ser transportada por difusão, no qual a concentração tende a se igualar em todos os pontos do sistema, com o passar do tempo. Conforme Guzella (2010), duas leis explicam o mecanismo de lixiviação por difusão: uma lei que considera o processo de difusão sob condições de estado estacionário (o gradiente de concentração não varia com o tempo), chamada de 1ª Lei de Fick e a 2ª Lei de Fick.

Da mesma forma é explicado o mecanismo de lixiviação por difusão que acontece quando o teste de lixivação é similar à exposição de materiais em chuvas, no qual mais dois fatores além do tempo regem o fenônemo da lixiviação. Segundo John e Ângulo (2003) estes fatores são ciclos de molhagem e secagem na camada externa e difusão para profundidades maiores. Diante desse fato, provavelmente os ensaios com corpos-de-prova submersos em soluções lixiviantes, como os testes de imersão, não são os mais adequados para estruturas submetidas a ciclos de molhagem e secagem. No caso de a avaliação de um elemento construtivo que é exposto à chuva e, portanto, às intempéries, durante sua fase de uso, optar por um teste de lixiviação que não simule as condições ambientais reais, há a possibilidade de não se reproduzir o resultado real e não se representar fielmente o mecanismo de lixiviação que ocorre.

Os mecanismos de lixiviação aplicados em uma matriz de cimento Portland, conforme Figura 5, podem ocorrer por meio da dissolução, difusão ou lavagem superficial.

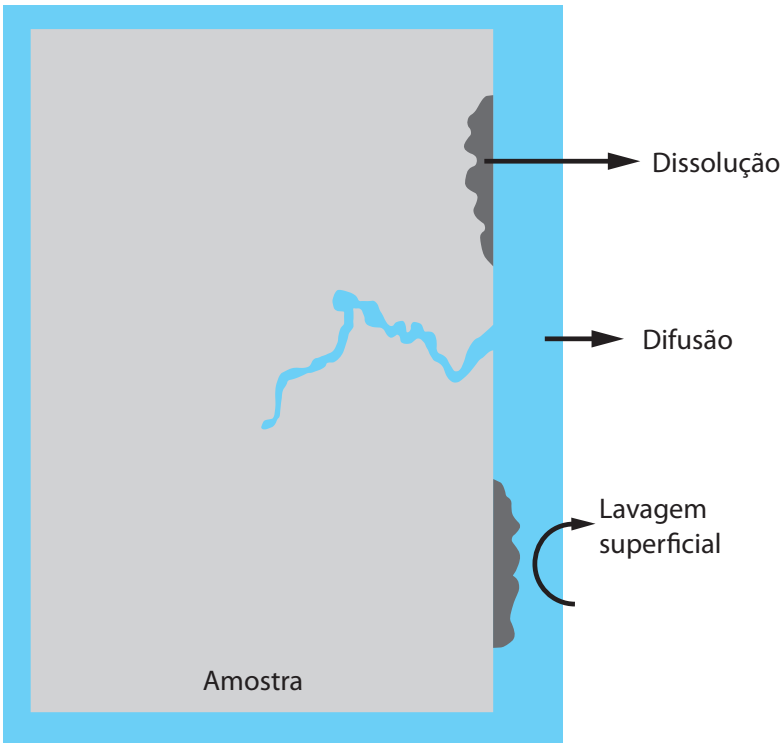


Figura 5. Mecanismos de lixiviação de produto em matriz de cimento Portland. *Fonte*: Groot e Van der Sloot (1992).

Segundo Van Gerven *et al.* (2002) e Groot e Van der Sloot (1992), os mecanismos de lixiviação de produto em matriz de cimento Portland podem ser definidos como:

- **Dissolução –** é determinada pela solubilidade da matriz que se origina em sua superfície. A dissolução de compostos pode apresentar a desintegração de um monólito ou parte dele. A remoção de elementos como Ca e Si pode levar a desintegração da matriz monolítica, não havendo necessidade do transporte de compostos;

- **Difusão –** refere-se à dissolução dos compostos na água presente no poro, seguido por transporte para fora da matriz se direcionando a solução lixiviante. Este transporte de difusão é impulsionado pelo gradiente de concentração da solução dos poros e pela solução lixiviante;

- **Lavagem superficial –** implica na dissolução de compostos na superfície de um monólito, que pode conter, em sua superfície, uma camada com produtos relativamente solúveis, seguida pelo transporte desses compostos a partir da superfície do monólito, para a maior parte do agente de lixiviação.

Os mecanismos de lixiviação controlados podem ser distinguidos pelo potencial disponível para a lixiviação, por solubilização ou reações de sorção e por limitações de transferência de massa. A limitação de transporte por difusão é um exemplo, pois devido aos diferentes mecanismos de lixiviação, deve ser feita uma distinção entre materiais granulares e materiais monolíticos, em que a resistência de difusão para o transporte desempenha um papel importante (SLOOT, 1998).

Com isso, pode-se justificar a importância de testar um produto em forma de monólito, pois assim será possível estudar o mecanismo de lixiviação e verificar como ocorreria em uma situação real a lixiviação de um produto E/S quando exposto ao ambiente.

2.5. Fatores que Influenciam a Lixiviação

O processo de lixiviação é influenciado por fatores físicos e químicos. A composição química e as características físicas de um material avaliado por um teste de lixiviação podem afetar direta e indiretamente a liberação de contaminantes de resíduos E/S ou granulares (CONNER, 1990; SLOOT e HEASMAN, 1997).

Dos fatores físicos que influenciam a lixiviação, os mais relevantes estão associados à área superficial, às propriedades das partículas, ao escoamento pela partícula, à técnica de agitação e ao equipamento utilizado, bem como às características da solução lixiviante, à proporção solução lixiviante/amostra, ao tempo de contato e à temperatura.

A forma do produto é fundamental no processo de lixiviação. Em materiais granulares, exemplificados pelos agregados, no caso de materiais de construção, o efeito da área superficial é relativamente mais importante que nos produtos íntegros. Mantendo-se constante o material a ser lixiviado e a solução lixiviante, quanto maior for a relação entre a área superficial e o volume, mais relevantes são os fenômenos superficiais e a velocidade de percolação da solução, e vice-versa (JOHN; ÂNGULO, 2003). A Tabela 2 resume os aspectos de cada influência física na taxa de lixiviação.

Tabela 2. Fatores que influenciam a lixiviação.

Aspecto físico	Influência na lixiviação
Área superficial do sólido	Quanto menor a granulometria das partículas sólidas, maior a área superficial, aumentando a lixiviação.
Porosidade	Materiais com baixa porosidade são menos permeáveis e irão diminuir a velocidade do fluxo da lixiviação.
Característica da solução lixiviante	Soluções lixiviantes agressivas com pH moderadamente baixo aumentam a solubilidade de fases minerais contidas em resíduos pontencialmente perigosos, aumentando a lixiviação.
Proporção solução lixiviante/amostra	Baixa proporção solução lixiviante/amostra reduz a solubilidade de certos constituintes. Geralmente altas proporções são mais apropriadas.
Tempo	Quanto menor o tempo de contato entre a solução lixiviante e o sólido, menor é a probabilidade de alcançar ou aproximar-se do equilíbrio entre o sólido e o líquido.
Temperatura	A solubilidade de determinados constituintes depende diretamente da temperatura. Geralmente altas temperaturas favorecem a solubilidade dos sais.

Fonte: Basegio (2004).

As reações químicas dos constituintes de resíduos inorgânicos compreendem basicamente reações de hidrólise, nas quais normalmente um metal reage com a água formando um novo composto metálico iônico ou neutro que apresenta diferentes solubilidades entre si. Por sua vez, a solubilização desse novo composto formado está associada a sua própria natureza e à natureza da solução lixiviante empregada, assim como à temperatura, à pressão do sistema e a outras variáveis. A solubilidade em água obedece às seguintes regras (VOGEL, 1992):

- Sais dos metais alcalinos e de amônio são solúveis em águas, assim como os nitratos (NO_3^-) e os acetatos (CH_3-COO^-);
- Cloretos (Cl^-), brometos (Br^-) e iodetos (I^-), em sua maioria, são solúveis, sendo as exceções principais o cloreto de chumbo ($PbCl_2$), cloreto de prata (AgCl), cloreto de cobre (CuCl), cloreto de mercúrio (Hg_2Cl_2), brometo de chumbo ($PbBr_2$), brometo de prata (AgBr), brometo de cobre (CuBr), brometo de mercúrio (Hg_2Br_2), iodeto de chumbo

(PbI_2), iodeto de prata (AgI), iodeto de cobre (CuI) e iodeto de mercúrio (HgI_2);

- Sulfatos (SO_4^{2-}), em sua maioria, são solúveis na água, sendo principais exceções: sulfato de cálcio ($CaSO_4$), sulfato de estrôncio ($SrSO_4$), sulfato de bário ($BaSO_4$) e sulfato de chumbo ($PbSO_4$);
- Sulfetos (S^{2-}) e hidróxidos (OH^-), em sua maioria, são insolúveis na água. Principais exceções: Sulfetos de metais alcalinos e metais alcalino-terrosos e de amônio, os quais são solúveis em água;
- Carbonatos (CO_3^{2-}), fosfatos (PO_4^{3-}) e os sais dos outros ânions não mencionados anteriormente, em sua maior parte, são insolúveis na água. Exceções: Os sais dos metais alcalinos e de amônio são solúveis;
- Óxidos de metais alcalino-terrosos reagem com a água. Os demais óxidos básicos são poucos solúveis em água.

Entretanto, existem substâncias que, quando não dissolvidas pela água, podem ser dissolvidas em soluções ácidas. O ácido nítrico (HNO_3) diluído é muito utilizado para solubilização de alguns óxidos de metais, como o óxido de cromo, o óxido de ferro e o óxido de alumínio, porém, o HNO_3 concentrado é um forte agente oxidante. Um exemplo é a solubilização do óxido de cobre (CuO) que ocorre segundo a reação da Equação 1:

$$2HNO_3(aq) + CuO(s) \rightarrow Cu(NO_3)_{2(aq)+} H_2O_{(l)} \qquad \text{Equação 1}$$

Diante de soluções ácidas, o cromo pode se apresentar nas suas formas trivalente (Cr^{3+}) e hexavalente (Cr^{6+}). A Figura 6 mostra a distribuição das valências de cromo em solução ácida conforme o potencial de ionização (nE).

Na Figura 6, é possível observar que o cromo, na sua forma Cr^{3+} , é muito estável em condições de redução, sendo necessária alta energia para conversão desse íon a baixos e altos número de oxidação. Consequentemente, temperatura e atmosfera oxidante podem contribuir para uma mudança no estado de valência do cromo, de 3^+ para 6^+. O Cr^{6+} em solução ácida apresenta potencial de redução alto, sendo um forte agente oxidante e instável na presença de doadores de elétrons, por isso, há uma tendência do cromo ser dissolvido em contato com soluções ácidas.

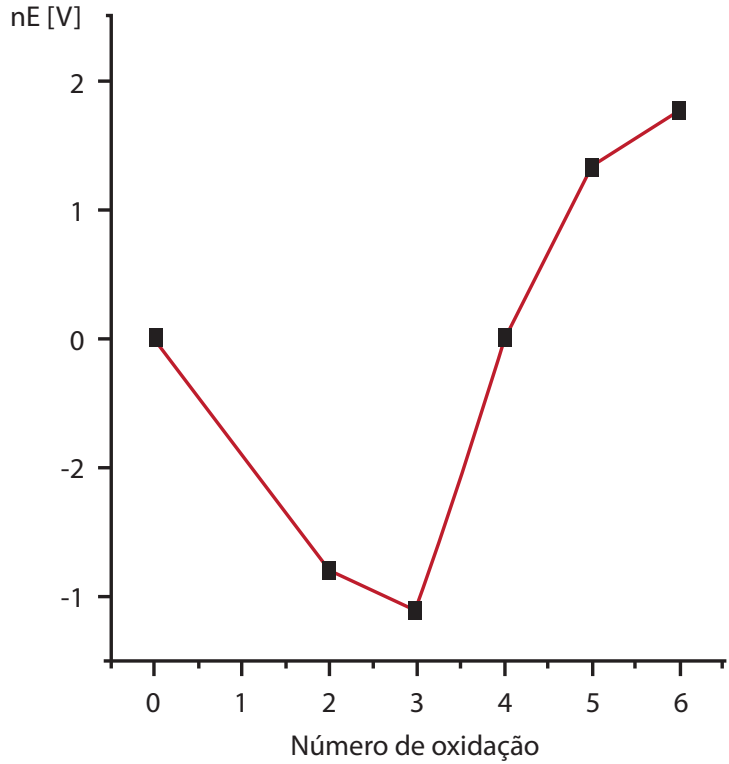


Figura 6. Distribuição das valências de Cr em solução ácida conforme o potencial. *Fonte*: Shriver et al., (1994).

Ácido Clorídrico também é utilizado na solubilização de materiais. Indicado para compostos carbonatados, para alguns óxidos e metais, é um excelente solvente para amostras inorgânicas e orgânicas. Pode-se citar, como exemplo, a solubilização de óxido de Ferro (III) – Fe_2O_3, representada nas reações da Equação 2 e da Equação 3:

$$6HCl_{(aq)} + Fe_2O_{3(s)} \rightarrow 2FeCl_{3(aq)} + 3H_2O_{(l)} \qquad \text{Equação 2}$$

$$Fe^{2+}_{(s)} + 2HCl_{(aq)} \rightarrow FeCl_{2(aq)} + H^{+}_{(g)} \qquad \text{Equação 3}$$

Tratamento com água régia é outra forma de solubilização, utilizado em metais. Consiste em uma mistura de ácido nítrico com ácido clorídrico, sendo este capaz de dissolver platina, ouro, paládio e metais nobres. As reações da Equação 4 e da Equação 5 demonstram a solubilização do ouro em meio ácido:

$$Au + 3NO_3^- + 6H^+ \rightarrow Au3^+ + 3NO_2 + 3H_2O \qquad \text{Equação } \mathbf{4}$$

$$Au^{3+} + 4Cl- + H^+ \rightarrow HAuCl_4 \qquad \text{Equação } \mathbf{5}$$

Existem ainda substâncias que, quando não dissolvidas por ácidos, geralmente podem ser dissolvidas por um fundente inorgânico, suficientemente aquecido para estar fundido. Como exemplos de agentes inorgânicos fundentes podem ser citados:

- pirosulfato de potássio – utilizado para decomposição de alguns óxidos e fosfatos como o óxido de titânio;
- peróxido de sódio e hidróxido de sódio – recomendados para solubilização de óxidos de cromo;
- carbonato de sódio anidro – usado para solubilização de materiais silicosos.

Na prática, o lixiviante deve ser aquele que está em contato com o resíduo (ROSA, 2001). A composição da solução lixiviante deve simular as condições ambientais reais de campo, como por exemplo, ambientes salinos (água do mar), presença de gás carbônico e de acidez (chuva ácida) e casos particulares de águas residuais industriais (FIGUEIREDO, 2008).

A característica de pH da solução lixiviante está entre os fatores químicos que mais interferem na lixiviação. O potencial hidrogeniônico frequentemente tem um papel decisivo na lixivibialidade de constituintes de resíduos sólidos, além de controlar demais fatores químicos como a complexação com agentes orgânicos ou inorgânicos, potencial redox e ainda reprecipitação ou sorção.

A complexação com agentes orgânicos e inorgânicos permite que os constituintes que não são solúveis em condições normais na solução lixiviante, sejam mobilizados e alcancem concentrações superiores a concentrações de equilíbrio da fase mineral presente no sistema (SLOOT e HEASMAN, 1997).

O potencial redox influi na mobilidade de alguns metais através da matriz sólida, quando há presença de agentes oxidantes e redutores. Exemplos de metais que são atacados por reações de oxidação aumentando sua lixiviação são o cromo, o manganês, o ferro e o níquel (CONNER, 1990). Em condições redutoras, normalmente a lixiviação dos metais diminui.

No que diz respeito às reações de sorção, estas envolvem moléculas e íons que podem aderir-se à superfície do sólido por meio de ligações químicas

fortes e fracas. As ligações iônicas são caracterizadas por serem enlaces muito fortes entre os átomos envolvidos, já as ligações covalentes e forças de Van der Waals representam forças mais fracas. Muitas das fases sólidas minerais possuem essas propriedades sortivas, as quais são atribuídas à forças não tão equilibradas na superfície do sólido e, portanto, capazes de ligar constituintes dissolvidos sobre a superfície, diminuindo a lixiviação do material. Este fenômeno é muito significativo e explica a baixa probabilidade que as espécies sorvidas têm de passarem para dessorvidas, quando há ligações fortes, a menos que as condições relacionadas com o pH e potencial redox no lixiviado variem significativamente (SLOOT e HEASMAN, 1997). Por exemplo, em uma condição de alcalinidade muito elevada no lixiviado, acima do pH 11 ou em circunstâncias ácidas, a solubilidade aumenta, para a maioria dos hidróxidos metálicos.

De acordo com Townsend *et al.* (2003), existem vários fatores tanto químicos como físicos, que controlam a lixiviação de resíduos em produtos. Os fatores físicos incluem tamanho de partícula, reação líquido/sólido, temperatura e porosidade. Já os fatores químicos incluem pH, potencial redox do material, processos de sorção e formação de complexos com compostos orgânicos ou inorgânicos.

Segundo, Sloot *et al.* (1997), Townsend *et al.* (2003) e Basegio (2004), os principais fatores físicos que podem influenciar na lixiviação são o tamanho de partículas, a relação sólido/líquido, a temperatura e a porosidade.

O **tamanho de partícula** está associado à área superficial do material submetido à lixiviação. Quando o material sólido possui uma área superficial grande, ocorre uma dissolução mais efetiva no lixiviado, devido a maior área de contato entre este e o lixiviante, pois quanto menor for a granulometria das partículas sólidas, maior a área superficial, aumentando, com isso, a lixiviação;

A **relação sólido/líquido (S/L)** define o volume de solução de extração que permanece em contato com o material residual ou o produto de E/S a ser analisado, influenciando as concentrações obtidas. Em menor relação S/L, as concentrações são maiores e diminuem com o aumento da relação S/L, pois há diluição do material. Além disso, quanto menor for o tempo de contato entre o material e o líquido, menor será a proporção da concentração de constituintes liberados.

A solubilidade dos constituintes relaciona-se, em alguns casos, à **temperatura**. São vários os aspectos influenciados pela temperatura na lixiviação. Usualmente, nas pesquisas de lixiviação adota-se o uso da temperatura ambiente (20-25ºC). Sendo que temperaturas elevadas podem favorecer a solubilidades dos sais.

A velocidade em que o lixiviante irá atravessar as partículas é determinada pela **porosidade** do material. Em materiais com porosidade baixa e menor permeabilidade ocorre uma diminuição da velocidade do fluxo da lixiviação.

Dentre os fatores químicos que podem influenciar o processo de lixiviação, pode-se citar: o pH, o potencial redox do material, as reações de sorção, e os agentes complexantes (SCHIOPU et al., 2009; SCHAEFER, 2007; SLOOT et al.; 1997; BASEGIO, 2004).

O **pH** afeta a lixiviação de contaminantes, pois à medida que diminui o pH, a dessorção de metais aumenta, assim, os metais são mais solúveis em condições ácidas, o que pode ser atribuído à tendência de metais para formar óxidos de metal solúveis em ambientes ácidos, sendo que a solubilidade de alguns metais, pode aumentar em condições alcalinas extremas devido a sua capacidade de formar compostos de hidróxido de metal solúveis. Em caso de demolição mecânica ou degradação natural, as mudanças de pH associada à carbonatação, pode levar a alterações na lixiviação de oxiânions. As tensões de um material sob influências externas, como a carbonatação, pode ser quantificada e traduzida em uma alteração de pH. Pode ocorrer a precipitação de metais em forma de sais, como carbonatos, silicatos, sulfatos. O pH na lixiviação é estabelecido, geralmente, pela dissolução da principal fase mineral do sólido ou pelo CO_2 atmosférico. Em relação ao controle de pH, a diferença entre os sistemas fechados e abertos deve ser considerada, pois podem ser influenciados pelo CO_2 da atmosfera.

O **potencial redox do material** pode ser significante na lixiviação de contaminantes em materiais residuais. A presença de agentes redutores ou oxidantes pode desenvolver modificações no estado de valência de alguns metais, comprometendo sua mobilidade através da matriz sólida até o lixiviante. Em condições redutoras, normalmente, a lixiviação dos metais diminui. O Cr III e Cr VI podem ser citados, como exemplo: o Cr III possui menor solubilidade em água e menor mobilidade, enquanto o Cr VI é mais móvel e tóxico no ambiente. Em oxidação, o Cr III se converte em Cr VI, tornando-se mais tóxico. Em ambientes como aterros sanitários, podem

se formar condições de redução, sendo os metais imobilizados dentro dos resíduos.

As fases sólidas de um material podem unir constituintes dissolvidos na superfície por **reação de sorção**, que é a fixação de moléculas e íons capazes de prender-se à superfície do sólido por ligações iônicas (forças fortes) e de Van der Waals (forças fracas). Isso ocorre, pois, na superfície do sólido, as forças de coesão não estão equilibradas e acontecem atrações entre moléculas e íons para a superfície do sólido. Assim, a carga da superfície nos locais de sorção determina se são retidos cátions ou ânions. Ligações fortes impossibilitam que uma espécie sorvida torne-se dessorvida, exceto se o pH e potencial redox variem expressivamente.

Os constituintes que não seriam solúveis em condições normais no lixiviado podem ser mobilizados, devido à presença de **agentes complexantes**, levando a formação de complexos com compostos orgânicos ou inorgânicos.

Os fatores físicos e químicos que influenciam na lixiviação tornam o processo complexo, o que leva a uma série de condicionantes para estabelecer os testes de extração por lixiviação, os quais buscam analisar a periculosidade de um resíduo ou a segurança de um processo de estabilização por solidificação.

2.6. Testes de Lixiviação

Em produtos à base de cimento Portland, a utilização crescente de materiais alternativos para adição ou substituição do cimento e dos agregados tem grande potencial para causar danos ao meio ambiente (SCHIOPU et al., 2009). O dano ambiental causado pela utilização de um resíduo em uma matriz à base de cimento pode ser originado em qualquer fase do ciclo de vida de um produto ou componente (fabricação, distribuição, construção, utilização, fim de vida). A maior preocupação ocorre na fase de fim de vida, na qual os produtos possuem maior potencial de risco de lixiviação, devido a sua disposição em contato com a água da chuva. No entanto, durante a etapa de uso também pode haver lixiviação, gerando prejuízos ao ambiente e problemas de saúde para as pessoas que habitam o local onde o material está exposto.

No Brasil, a forma usual de se prever o impacto ambiental causado pela disposição de um resíduo ou de uma matriz contendo resíduo, é a utilização de testes de lixiviação. Silva (2007) salienta que a finalidade dos testes de lixiviação

é verificar se os componentes perigosos permanecem encapsulados nos sólidos produzidos por E/S ou se as concentrações obtidas para as substâncias consideradas perigosas estão dentro dos limites estipulados pelas normas ambientais. Há diversos métodos de ensaio, que se diferem pelo pH da solução lixiviante, pela agitação do meio, pela forma da amostra, pela proporção entre amostra e solução lixiviante, pelo tempo de exposição, entre outros fatores. Alguns métodos buscam investigar o equilíbrio ou o semiequilíbrio entre o resíduo e a solução lixiviante, outros forçam a percolação da solução e há métodos que admitem que a solução lixiviante seja frequentemente renovada. Como consequência, John e Ângulo (2006) salientam que materiais que contêm resíduos são muitas vezes submetidos a testes que não se aproximam das condições reais das quais o material será submetido durante seu ciclo de vida.

Normalmente, a escolha entre os vários tipos de testes de lixiviação é feita conjuntamente entre o órgão ambiental responsável e o gerador (CAUDURO; ROBERTO, 2002) e pode variar de país para país, conforme suas regulamentações. As regulamentações podem envolver normas ou protocolos. Os protocolos constituem-se de um conjunto de normas que levam em conta vários aspectos para avaliar os materiais, como integridade física, propriedades mecânicas e de lixiviação. Segundo Brito (2007), os principais documentos que são usados para avaliar materiais que incorporam resíduos são os protocolos do Canadá e da França e o modelo dos Estados Unidos, elaborados respectivamente pelas agências *Waste Technology Center* (WCT), *Association Française de Normalization* (AFNOR) e *United States Environmental Protection Agency* (U.S. EPA). No Brasil, não é utilizado um protocolo para avaliação ambiental de um produto que incorpore resíduo ou da estabilização por solidificação (E/S) de contaminantes. Essa avaliação é feita a partir de normas vigentes no país, como a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e a NBR 10.006 (ABNT, 2004c).

2.6.1. Método Aplicado no Brasil

No Brasil, a norma utilizada para avaliação de estabilização/solidificação é a NBR 10.005 (ABNT, 2004b), cujo objetivo é analisar a lixiviação de resíduos (e não de produtos), simulando o cenário de um aterro. Não há norma específica para a avaliação de produtos com E/S. Segundo a norma citada, lixiviação é o processo que determina a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de

dissolução no meio extrator. Ela fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando a diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) entre classe I – perigosos – e classe II – não perigosos.

Para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, adota-se a NBR 10.006 (ABNT, 2004c), que tem o objetivo de diluir substâncias contidas nos resíduos, por meio de lavagem em meio aquoso. A norma fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10.004 (ABNT, 2004a) como classe II A – não inertes e classe II B – inertes, não se aplicando aos resíduos no estado líquido.

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), os resíduos não perigosos e não inertes são os que não se aplicam nas classificações de resíduos perigosos (classe I) ou de resíduos não perigosos e inertes, podendo ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Inertes são considerados quaisquer resíduos que quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004d), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

– Ensaio de lixiviação (NBR 10.005:2004): o procedimento consiste em pesar 100 g de amostra com granulometria inferior a 9,5mm, mantê-la em um frasco de lixiviação por 18 horas e coletar o extrato lixiviado, do qual será determinado o pH.

– Ensaio de solubilização (NBR 10.006:2004): O procedimento consiste em coletar uma amostra representativa de 250 g (base seca) do resíduo, com finura inferior a 9,5 mm, e deixá-la em solução em 1000 mL de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos por 7 dias. Após esse período, filtra-se a solução e determina-se o pH do extrato solubilizado.

Embora não esteja escrito de forma clara no conceito de lixiviação pela NBR 10.005 (ABNT, 2004b), a extração dos constituintes químicos dos resíduos ocorre por meio de um fluído percolante (líquido com potencial de dispersibilidade) com característica ácida. A norma NBR 10.006 (ABNT,

2004c) também não descreve exatamente no conceito de solubilização que a extração é realizada por meio de lavagem com água.

2.6.2. Métodos Aplicados em Outros Países

Segundo Townsend et al. (2003) os testes de lixiviação que mais têm sido utilizados nos Estados Unidos são os que incluem toxicidade e procedimento de extração (*EP, U.S EPA Method 1310, U.S EPA Method 1313 e U.S EPA Method 1316*), procedimento de lixiviação e características de toxicidade (*TCLP U.S EPA Method 1311*), teste de coluna (*U.S EPA Method 1314), teste de tanque semidinâmico* (*U.S EPA Method 1315) e* teste de extração e processo de extração múltipla (*MEP, U.S Method EPA 1320*), ANS 16.1 (*American Nuclear Society*). Na Europa os mais utilizados são o ANC (*Acid-Neutralizing Capacity*), DIN 38414 (*German Standard Methods*), AFNOR (*NF X31-211 – Association Française de Normalization*), teste de coluna (*NEN 7343:1995 – Netherlands Standardization Institute*), ensaio de disponibilidade (*NEN 7371:2004 – Netherlands Standardization Institute*) e ensaio de tanque (*NEN 7345:1995 e NEN 7375:2004 – Netherlands Standardization Institute*). Nesse contexto, Jacob (2012), Rosa (2001), Brito (2007) e Groot e Sloot (1992) citam os testes de lixiviação mais comumente aplicados em outros países. Na Tabela 3 é possível verificar as principais diferenças entre os procedimentos de lixiviação descritos nas normas citadas.

Tabela 3. Comparação de parâmetros de testes de lixiviação de algumas normas técnicas.

Origem	Norma de lixiviação	Meio líquido	Relação amostra/ líquido	Período do teste	Forma da amostra
Alemanha	DIN 38414-4 (DIN, 1984)	Da amostra	1:10	24 h	Triturada (<10 mm)
Estados Unidos	Method 1311 TCLP (U.S EPA, 1992)	Água destilada com pH<5,0	1:20	18 h	Triturada (9,5 mm)

Fonte: Adaptada de Rosa (2001) e Lunkes (2013).

Tabela 3. *Continuação.*

Origem	Norma de lixiviação	Meio líquido	Relação amostra/ líquido	Período do teste	Forma da amostra
	Method 1320 MEP (U.S EPA, 1986)	Solução ácida pH 5,0 (24 h iniciais) Solução ácida pH 3,0 (8 extrações)	1:16 (24 h iniciais) 1:20 (8 extrações)	Extração inicial de 24 h + 8 extrações de 24 h cada	--
	ANS 16.1 (ANS, 2003)	Água desmineralizada	--	Enxague inicial de 30 s + série de extrações	Bloco sólido (monólito)
	Method 1310B EP (U.S EPA, 2004)	Solução ácida pH 5,0	1:20	24 h	Triturada (<9,5 mm)
França	NF X31-211 (AFNOR,2012)	Água desmineralizada	1:10	3 extrações de 16 h cada	Bloco sólido (monólito)
Holanda	NEN 7343	Água destilada	0,1 a 10 L/kg	--	Triturada
	NEN 7345 (NEN, 1995)	Solução ácida pH 4,0	1:5	0,25 a 64 dias	Bloco sólido (monólito)
	NEN 7371 (NEN, 2004)	Água destilada e solução ácida pH 4	--	6h	Triturada (125 µm)
	NEN 7375 (NEN, 2004)	Água destilada	1:5	0,25 a 64 dias	Bloco sólido (monólito)
Brasil	NBR 10005 (ABNT, 2004a)	Solução ácida pH 5,0	1:20	18 h	Triturada (<9,5 mm)
	NBR 10005 (ABNT, 2004b)	Água destilada	1:4	7 dias	Triturada (<9,5 mm)

Fonte: Adaptada de Rosa (2001) e Lunkes (2013).

É possível observar que os métodos divergem entre si quanto à solução lixiviante, a relação amostra/líquido, o tempo de ensaio e a forma da amostra. Para fins de uma simulação mais agressiva, foi verificado que entre oito

normas apresentadas, cinco utilizam meio ácido com pH situado entre 3 e 5, o que pode ser um indicador para a escolha da solução a ser adotada. Quatro normas empregam ciclos de extrações, sendo o mais longo de 64 dias, o que se considera excessivo.

3. Métodos de Obtenção de Extrato Lixiviado para Componentes de Construção

3.1. Métodos com Imersão em Tanque

As normas NEN 73745:1995 e NEN 7375:2004 propõem a realização de ensaios de imersão em tanque. O método consiste na determinação da lixiviação de monólitos a partir de materiais construção e resíduos, por meio de um teste de difusão. Esse ensaio simula um processo que quando o material monolítico é menos poroso do que os materiais ao seu entorno, o lixiviante tem uma tendência a escorrer em torno do resíduo. As amostras para o ensaio são ordenadas em tanques de plástico e imersas em uma solução de água destilada e acidificada (pH 4) com HNO_3 e relação amostra : líquido de 1:5. O método é dividido em oito etapas de renovação do lixiviante: 0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16; 36 e 64 dias. Em cada etapa, o extrato lixiviado deve ser coletado e filtrado a vácuo em papel filtro de malha 28µm. O pH e a condutividade elétrica de cada extrato coletado devem ser analisados. A partir dos resultados de concentração do elemento, em cada etapa do ensaio, realiza-se uma regressão linear, da concentração acumulada em mg/m² do elemento até o tempo do ensaio. Encontra-se o coeficiente angular da reta passante pelos pontos de coleta de amostra. Para uma melhor análise, dividem-se essas observações em 4 etapas: início (pontos de 1 a 3), meio (pontos de 3 a 6), fim (pontos de 5 a 8) e geral (pontos de 2 a 7); o coeficiente angular da regressão linear para cada parte é calculada. Segundo a norma, se o coeficiente angular for maior que 0,65, o mecanismo de lixiviação é dissolução, se o coeficiente for menor ou igual a 0,65 e maior que 0,35, o mecanismo de lixiviação é a difusão e, se for menor que 0,35, o mecanismo é a lavagem superficial. É possível calcular o coeficiente de difusão de um componente único por meio do procedimento da norma, podendo ser apresentado que a lixiviação é de difusão controlada. Na Figura 7, apresenta-se uma câmara em acrílico onde é realizado o teste de tanque.

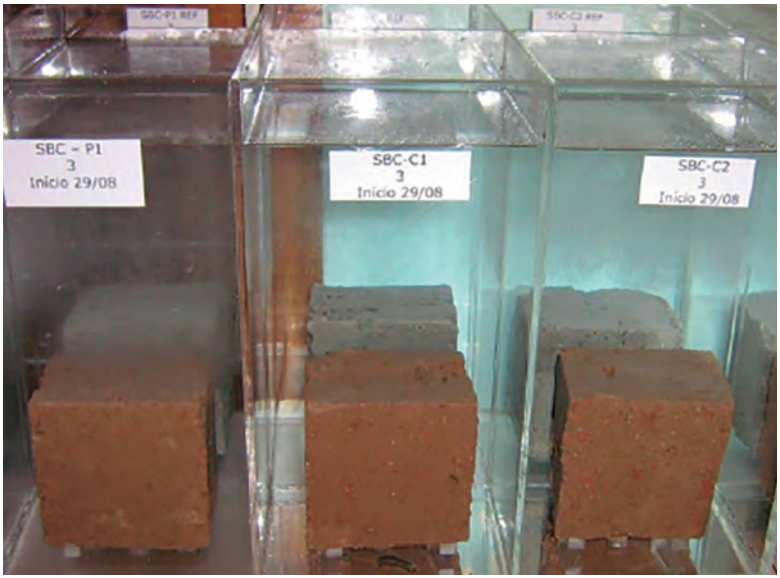


Figura 7. Ensaio de tanque. *Fonte*: Jacob (2012).

No ano de 2004, a NEN 7345 foi atualizada para a versão NEN 7375. O que difere uma da outra é o uso de água destilada em vez de água acidificada (pH 4). Segundo Jacob (2012), ao utilizar água com pH neutro, em materiais com capacidade tampão baixa (escória vitrificada, escórias industriais e produtos sinterizados), o início da lixiviação é mais intenso do que o encontrado em pH ácido.

Avaliando os métodos de lixiviação apresentados, verificam-se diferenças relacionadas à característica do meio líquido, à proporção amostra/líquido, ao tempo de contato do meio líquido com a amostra e à integridade física da amostra. A norma brasileira, NBR 10.005 preconiza critérios de lixiviação similares às normas americanas TCLP e EP, até mesmo o equipamento em que são realizados os procedimentos de extração do lixiviado ilustrado pela NBR 10.005 é praticamente igual ao retratado pela norma TCLP Percebe-se que a maior parte dos testes de lixiviação utilizados para caracterização de produtos da E/S consideram condições de disposição final em aterro, utilizando, assim, a amostra fracionada. Poucos são os testes que utilizam amostras em sua forma íntegra, como se apresentam nas normas holandesas NEN 7345 e NEN 7375, na americana ANS 16.1 e na francesa AFNOR, os quais seriam mais indicados ao se avaliar produtos E/S. Os métodos que apresentam a amostra em sua forma monolítica seriam os mais indicados para se avaliar

novos materiais com resíduos que são estabilizados e solidificados, pois assim é possível verificar se o fator tempo tem influência na lixiviação de compostos tóxicos ao ambiente, bem como constatar se realmente esses resíduos estão sendo encapsulados dentro da matriz construtiva.

3.2. Métodos com Irrigação

Vollpracht e Brameshuber (2010) estudaram a importância do cenário de lixiviação para a avaliação da compatibilidade ambiental dos elementos minerais presentes em materiais de construção por meio da comparação entre um teste de irrigação e um teste de imersão. Os materiais de construção avaliados no teste foram paredes de concreto e alvenaria e um revestimento de cobertura com dimensões de 400mm x 300mm. No teste de irrigação, foi utilizado um bico de aspersão com controle de pressão da intensidade da água, para simular as condições de chuva. A água deionizada proveniente do contato com as paredes foi coletada em reservatório e analisada a cada ciclo de irrigação. Foram realizados 4 ciclos de irrigação (molhagem e secagem), simulando as precipitações semanais da Alemanha aos 7, 14, 21 e 28 dias com intensidades mínimas, médias e máximas de 0,7 mm/h, 1,5 mm/h e 3,5 mm/h. Os parâmetros analisados foram Cr, V e B. Na Figura 8, pode-se visualizar o esquema propostos dos dois testes.

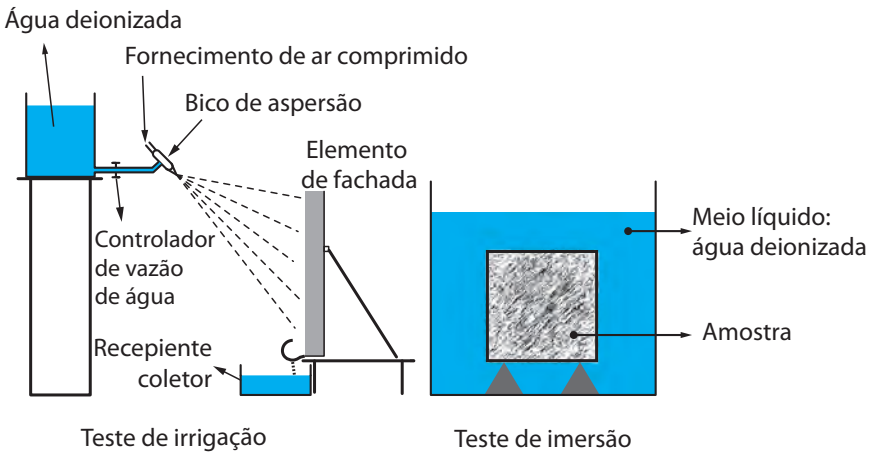


Figura 8. Testes de lixiviação por irrigação e imersão. *Fonte*: Vollpracht e Brameshuber (2010).

3.3. Método Inovatec/Unisinos

Em função da necessidade de um método de ensaio especifico para a avaliação ambiental de materiais de construção, foi desenvolvido, no âmbito do projeto FINEP Inovatec, o método Inovatec/Unisinos. A proposta para a avaliação de materiais e componentes de construção civil que incorporam resíduos é baseada nas normas abordadas anteriormente, utilizando-se como premissas a facilidade e o tempo de execução para a obtenção dos extratos lixiviados. As questões relativas à montagem dos dispositivos e aos procedimentos necessários para a execução são compreendidas como "facilidade" dos testes previstos para o método. A definição do tempo de execução, por sua vez, não tem a intenção de determinar que seja empregado o menor espaço de tempo, mas que sejam gerados resultados coerentes a partir de um tempo de ensaio aceitável pelo meio técnico da área e que se aproxime dos já praticados em outros métodos voltados para a avaliação de propriedades dos materiais e componentes de sistemas construtivos.

Os testes propostos têm a finalidade de simular, de forma acelerada, uma condição real de exposição da amostra à chuva ou ao contato mais prolongado com uma solução ácida. No entanto, por se tratar de ensaios de laboratório, os sistemas foram construídos em uma escala reduzida, e a aceleração do processo ocorreu em função da concentração adotada do meio lixiviante e de exposição da amostra a ciclos de molhagem e secagem. Os ensaios de ambos os testes foram executados em sala climatizada, com temperatura de 23 ± 1 ºC e umidade relativa do ar de 70 ± 5%. Além disso, ambas as propostas de teste, num primeiro momento, foram estudadas empregando-se a mesma solução lixiviante, para fins de avaliação dos métodos em condições de aceleração iguais.

Corpo de prova – foi proposto o emprego de uma placa de dimensões de 20×40×25 cm, de forma a atender a corpos de prova de diversos tipos de matrizes que incorporem resíduos e a oferecer uma superfície de exposição satisfatória.

Solução lixiviantes – a solução lixiviante, nesta etapa do projeto, compreendeu uma solução de HNO^3 ajustada para pH 3,0 ± 0,05. Para cada teste, foi empregado o mesmo volume de solução lixiviante de 11,2 L. Tomou-se como base para o dimensionamento desse volume o maior nível de

precipitação (140 mm) registrado pelo Instituto de Meteorologia na estação de Porto Alegre nos últimos 50 anos.

3.4. Teste de Imersão

O teste de imersão consiste na imersão de um corpo de prova em um reservatório preenchido com a solução lixiviante. Na Figura 9, é apresentada uma representação gráfica do recipiente de imersão e, na Figura 10, são exemplificados ensaios com material cerâmico em andamento. O reservatório de vidro tem dimensões de 30 cm de largura, 50 cm de comprimento e 15 cm de altura. A espessura do vidro do reservatório é de 5 mm. Compõem ainda o reservatório dois apoios de vidro posicionados no fundo. Os apoios, com as dimensões de 30 cm de comprimento e 5 cm de altura, encontram-se fixados paralelamente um ao outro, distanciados em 17 cm, de modo a garantir que o corpo de prova não fique em contato direto com o fundo do reservatório e que esteja envolvido em todas as faces por um volume mínimo de solução. O reservatório possui ainda uma tampa de vidro.

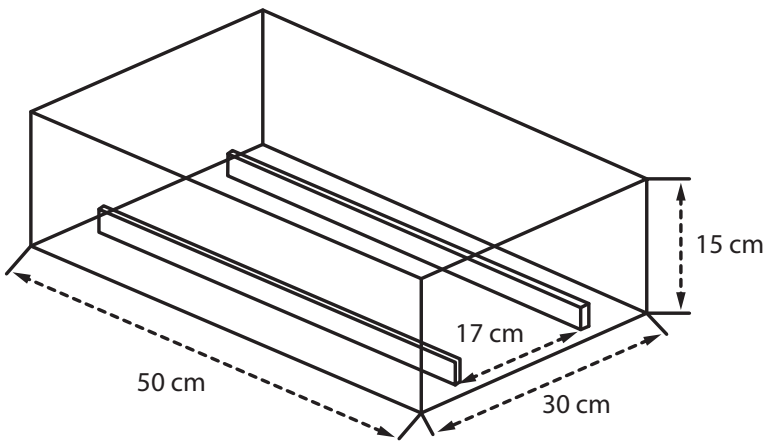


Figura 9. Dimensões do reservatório do teste de imersão.



Figura 10. Teste de imersão em execução.

Foram definidos 4 ciclos de 7 dias, totalizando um período de ensaio de 28 dias. Ao final de cada ciclo, o extrato lixiviado foi coletado em frascos devidamente preparados para acondicionar a amostra, encaminhada para análise de metais e para análise pela técnica Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-AES). A cada novo ciclo a solução é renovada.

3.5. Teste de Irrigação

O teste de irrigação consiste no gotejamento de uma solução lixiviante sobre um corpo de prova. A irrigação da solução lixiviante é realizada com uma vazão média de 7,8 mL/min. Para o teste de irrigação, foi utilizado um reservatório de vidro com 30 cm de largura, 30 cm de comprimento e 77 cm de altura. Na Figura 11, é possível observar o desenho do aparato que foi utilizado para o teste. Empregou-se vidro de espessura de 5 mm. Apoios de vidro com as dimensões de 20 cm de comprimento e 20 cm de altura encontram-se fixados paralelamente uns aos outros, no fundo do reservatório. Na parte superior do reservatório, foi fixado horizontalmente um dispositivo de irrigação, que tem a função de distribuir a solução lixiviante por meio de gotejamento. A alimentação com a solução lixiviante ocorre de forma contínua e com vazão constante. São realizados 4 ciclos de molhagem e secagem, cada um por um período de 24h de gotejamento da solução, seguido por um período de secagem de 6 dias, à temperatura ambiente, totalizando 28 dias de teste. A cada ciclo o lixiviado é coletado e devidamente conservado para posterior análise. Os corpos de prova são inclinados a 45º. O pH da solução lixiviante deve ser mantido entre 3,0 ± 0,05.

A Figura 12 apresenta o teste de lixiviação por irrigação em execução.

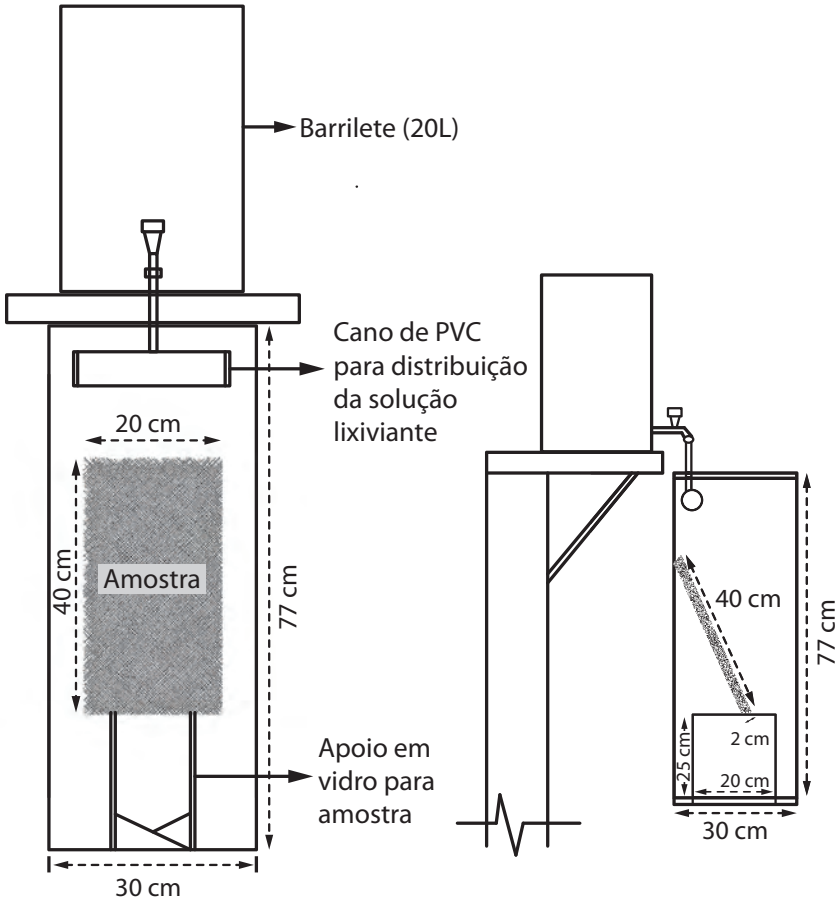


Figura 11. Aparato para o teste de irrigação: (a) vista frontal e (b) vista lateral.



Figura 12. Teste de lixiviação por irrigação em execução.

4. Considerações Finais

A avaliação ambiental de componentes de construção submetidos à ação de ciclos de molhagem e secagem deve ser feita de forma a reproduzir, da melhor maneira possível, a situação de exposição e os mecanismos de transporte de àgua que ocorrem nestes materiais. Deste modo, métodos para a avaliação ambiental desses componentes devem simular os ciclos de molhagem e secagem da camada externa e a difusão em profundidades maiores. Diante desse fato, ensaios com corpos-de-prova submersos em soluções lixiviante, como os testes convencionais de imersão, não são os mais adequados, sendo necessária, para a avaliação de um elemento construtivo exposto a intempéries durante sua fase de uso, a adoção de um teste que reproduza os mecanismos de lixiviação e difusão. Nesse sentido, propõe-se o método Unisinos/Inovatec como alternativa para uma melhor avaliação ambiental de componentes de construção civil expostos à chuva.

Referências Bibliográficas

AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. *ANS 16.1* – Measurement of the leachability of solidified low-level radioactive wastes. Chicago, 2003.

ASAVAPISIT, Suwimol; NANTHAMONTRY, Weena; POLPRASERT, Chongrak. Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 1147-1152. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005* – procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004* – resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.007*: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006* – procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NR 9575* – Impermeabilização – Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. *NFX31-211* – Caractérisation des déchets – Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. Paris, 2012.

BREHM, F. A. *et al.* Análise da Estabilização Por Solidificação de Lodo de Fosfatização em Matrizes de Cimento Portland e de Cerâmica Vermelha Para a Utilização na Construção Civil. *Ambiente Construído,* Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 15-27, abr./jun. 2013.

BREHM, Feliciane A. et al. *Adição de lodo de fosfatização como matéria-prima para a construção civil* – etapa laboratorial e industrial. Relatório. UNISINOS**:** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**,** São Leopoldo, 54p. 2007.

BRITO, A. L. F. *Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização Por Solidificação de Resíduos.* Florianópolis, 2007. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

CASTRO, Raimundo José de Souza. *Formulação e caracterização de matérias-primas para revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamote de telhas.* 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2008.

CASTRO, T. M. *Solidificação/Estabilização de Lodo Gerado no Tratamento de Efluente de Lavanderia Industrial Têxtil em Blocos Cerâmicos Acústicos e Seu Desempenho em Câmara Reverberante.* 86 f. Maringá, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2010.

CAUDURO, F.; ROBERTO, S. Avaliação Comparativa de Testes de Lixiviação de Resíduos Sólidos. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., Cancun, 2002. *Anais..* Cancun: AIDIS, 2002.

CHUI, Q. S. H. Uso de vermiculita massapé paulistana como adsorvedora de metais. *Engenharia Sanitária Ambiental,* v. 10, p. 58-63. 2005.

COHEN, Brett. The TCLP and its Applicability for the Characterisation of Worst Case Leaching of Wastes from Mining and Metallurgical Operations. *Advances in Environmental Research*, v. 3, n.2, p. 152-165. 1999.

CONNER, J. R. *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

CONNER, J. R.; HOEFFNER, S. L. A critical review of stabilization/solidification technology. *Critic. Rev. Environ. Sci. Technol.* 28(4), 397-462, 1998.

CRUZ, M. L. F. R. *A Caracterização de Resíduos Sólidos no Âmbito da sua Gestão Integrada.* 2005. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade do Minho, Distrito de Braga, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 38414-4* – German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S); determination of leachability by water. Berlin, 1984.

EIKELBOOM,R.T.; RUWIEL, E.; GOUMANS J.J.J.M. The Building Materials Decree: an example of a Dutchregulation based on the potential impact ofmaterials on the environment. *Waste Management,* v. 21, n. 3, p. 295-302, 2001.

FERREIRA, U. V. S. *Interação de aminas aromáticas e alifáticas com argilominerais – isotermas e calorimetria.* 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2008.

FIGUEIREDO, S. C. *Estudo exploratório de incorporação da lama de filtros rotativos a vácuo (LFRV), gerada na Millennium Inorganic Chemicals, em uma matriz cerâmica vermelha.* 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Limpas no Processo Produtivo) – Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento e Tecnologias Limpas no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia , Salvador. 2008.

FONSECA, M. G.; DE OLIVEIRA, M. M.; ARARAKI, L. N. H. Removal of cadmium, zinc, manganese and chromium cations from queous solution by a clay mineral. *Journal of Hazardous Materials,* v.137, n.1, p.288–292. 2006.

GROOT, G.J. DE, VAN DER SLOOT, H.A., in: T.M. Gilliam, C.C. Wiles (Eds.), *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes,* vol. 2, ASTM STP 1123, ASTM, PA, 1992, p. 149-170.

GUINÉ, M. F. *Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente:* ICP-AES. Piracicaba: CPG-CENA-USP, 1998.

GUZELLA, M. F. R. *Desenvolvimento de processos para imobilização de rejeitos de usinas nucleares utilizando betumes nacionais.* 2010. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

HEREK, L. C. S. *et al.* Characterization of Ceramic Bricks Incorporated With Textile Laundry Sludge. *Ceramic International,* v. 38, p.951-959, 2012.

JACOB, J. S. *Modelos de previsão da liberação de metais pesados em matrizes cimentícias produzidas com resíduos inorgânicos.* 2012. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

MACHADO, A. T. *Estudo da incorporação e estabilização do pó de aciaria elétrica em matrizes de cerâmica vermelha.* 2005. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

MARANGON, A. A. S. *Compósitos de PVA/Caulinita e PVA/Caulinita Funcionalizada.* 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.2008.

McBRIDE, M. B. *Environmental Chemistry of Soil.* New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.

MEURER, E. J. *Fundamentos de Química do Solo.* 2. ed. Porto Alegre: Gênesis, 2004. 281 p.

MONTEIRO, C. M. O. L. *Influência da gipsita no surgimento de eflorescência em telhas cerâmicas.* 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, 2009.

MORAIS, D. M. de; SPOSTO, R. M. Propriedades tecnológicas e mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do Distrito Federal. *Cerâmica Industrial*, São Carlos, v. 11, p. 67-73, 2006.

NETHERLANDS NORMALIZATION. *NEN 7371:* Leaching characteristics of granular building and waste materials. The determination of the availability of inorganic components for leaching: The maximum availability leaching test. Netherlands, 2004.

NETHERLANDS NORMALIZATION. *NEN 7343:* Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials. Leaching tests. Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with the column test. Netherlands, 1995**.**

NETHERLANDS NORMALIZATION. *NEN 7345:* Determination of Release of Inorganic Constituents From Construction Material and Stabilized Waste products. Netherlands, 1995.

NETHERLANDS NORMALIZATION. *NEN 7345:* Determination of Release of Inorganic Constituents From Construction Material and Stabilized Waste products. Netherlands, 1995.

NETHERLANDS NORMALIZATION. *NEN 7375:* Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials Determination of Leaching of Inorganic Components with the Diffusion Test. "The Tank Test". Netherlands, 2004.

PARK, C. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using cementitious materials. *Cement and Concrete Research,* v.30, p.429-435. 2000.

PETRONI, S. L. G. *Avaliação Cinética e de Equilíbrio do Processo de Adsorção dos íons dos metais cádmio, cobre e níquel em turfa*. 2004. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências da Área de Tecnologia Nuclear) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

PINTO, C. A. *Estudo da Estabilização Por Solidificação de Resíduos Contendo Metais Pesados*. 229 f. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

POON, C. S.; CHEN, Z. Q. Comparison of the Characteristics of Flow-Through and Flow-Around Leaching Tests of Solidified Heavy Metal Wastes. *Chemosphere,* Amsterdam, v. 38, n 3. p. 663-680, 1999.

PUREZA, J. C. C. *Utilização de Resíduos Industriais de Baixa Granulometria em Massas Cerâmicas de Argila Vermelha*: aspectos tecnológicos e ambientais. Porto Alegre, 2004. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

ROSA, M. A. *Caracterização da Incorporação da escória de Aço Inoxidável em Materiais Cerâmicos Quanto a Imobilização de Cromo*. Porto Alegre, 2001. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

SANCHEZ, A. G.; AYUSO, E. A.; BLAS, O. J. Sorption of heavy metals from industrial waste by low-cost mineral silicates. *Clay minerals*, v. 34, p. 469-477, 1999.

SCHAEFER, C. O. *Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis. 2007.

SCHIOPU, N.; TIRUTA-BARNA, L.; JAYRA E.; MÉHUE J.; MOSZKOWICZ, P. Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions. *Science of the total environment.* v. 407, p.1613-1630, 2009.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W.; LANGFORD, C. H. *InorganicChemistry.* New York: Oxford, 1994.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚTRIA DE CIMENTO. *Relatorio Anual 2013 final*. 2013. Disponível em: < http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

SLOOT, H. A. Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. *Elsevier Science*, v. 17, n 5, 1998.

SLOOT, H. Environmental Efficiency of Immobilization Techniques For Wastes in Relation to Utilization and Disposal. In: ACTES DU CONGRÈS INTERNATIONAL SUR LES PROCÉDÉS DE SOLIDIFICATION ET DE STABILISATION DES DÉCHETS, Grenoble, 1997. *Anais..* Grenoble: Société Alpine de Publications, 1997.

SLOOT, H.; HEASMAN, L., QUEVAUVILLER, P. Harmonization of Leaching/ Extraction Tests. Studies in Environmental Science. *Elsevier Science*. Bilthoven, v. 70, 1997.

SLOOT, Hans van der; HEASMAN, Leslie. Harmonization of Leaching/Extraction Tests. Studies in Environmental Science. *Elsevier Science*. Bilthoven, v. 70, 1997.

STEGEMANN, J. A.; BUENFELD, N. R. Prediction of leachate pH for cement paste containing pure metal compounds. *Journal of Hazardous Materials*, v. 90, p. 169-188, 2002.

STEGEMANN, J.A.; CÔTÉ, P.L. *A proposed protocol for evaluation of solidified wastes*. The science of the total environmental. v. 178, p. 103-110, 1996.

TOWNSEND, T.; JANG, Y-CH.; TOLAYMAT, T. Leaching Tests for Evaluating Risk in Solid Waste Management Decision Making. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Report No. 03-01. Gainesville, FL, USA. 2003.

U.S. United States Environmental Protection Agency. *Technology Performance Review*: Selecting and Using Solidification/Stabilization Treatment for Site Remediation. EPA/600/R-09/148, Cincinnati, OH, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Method 1311 TCLP*: Toxicity Characteristic Leaching Procedure. Test Methods For Evaluating Solid Waste. Washington DC,1992.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Method 1320 MEP*: Multiple Extraction Procedure. Washington DC,1986.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Method 1310B EP*: Extraction procedure (EP) toxicity test method and structural integrity test. Washington DC, 2004.

VALVERDE, José. *Cetrel encapsula resíduos com argila modificada*. 2001. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/pquimica/23924/ambiente-cetrel-encapsula-residuos-com-argila-modificada/>. Acesso em 20 de fev. 2015.

VERDUCH, Antônio García.; SOLANA, Vicente Sans. Formação de Eflorescências na Superfície dos Tijolos. *Cerâmica Industrial,* v. 5, n. 5, p. 38-46, 2000.

VOGEL, Arthur Israel. *Química Analítica Qualitativa*. 5a edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1992.

WILES, C.C. A review of solidification/stabilization technology. *Journal of Hazardous Materials*, n. 14, p. 5-21, 1987.

WINGE, M. et. al. Glossário Geológico Ilustrado 2014. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso em: 18 fev.2015.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C004

Metodologia para Avaliação do Potencial Deletério de Resíduos em Matrizes Cimentícias: Contribuição à Norma de Desempenho

4

Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Angela Borges Masuero
Natália dos Santos Petry
Aguida Gomes de Abreu
Simone Dornelles Venquiruto

1. Introdução

Tudo que nos cerca um dia será resíduo: casas, automóveis, móveis, pontes, aviões. A este total, são somados todos os resíduos do processo de extração de matérias-primas, de produção de bens e de produção agrícola. Assim, em qualquer sociedade, a quantidade de resíduos gerados supera a quantidade de bens consumidos. A sociedade industrial, ao multiplicar a produção de bens, agravou este processo (ROCHA; JOHN, 2003).

Atualmente dentro do desenvolvimento sustentável, onde busca-se suprir as necessidades da geração atual sem comprometer as próximas, cinco principios fundamentais são adotados: repensar, recusar, reduzir, reutilizar e reciclar. Sendo que três destes são essenciais para atenuar os danos ambientais gerados pelos resíduos: minimizar a sua geração, reutilizá-los ou reciclá-los. Dentre estas alternativas, muitas vezes não é possível a diminuição de geração, tornando-se essencial a reutilização e reciclagem dos resíduos.

Neste contexto, a cadeia produtiva da indústria da construção civil ocupa papel de destaque, possuindo enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, em função da grande quantidade de materiais consumidos. Esta reciclagem e/ou reutilização de resíduos pela construção civil pode auxiliar na minimização da extração da matéria prima da natureza e

também auxiliar na escassez dos materiais que se depara, uma vez que a cadeia produtiva da construção civil consome entre 20 e 50% dos recursos naturais de todo o planeta (JOHN, 2001).

Dessa forma, a necessidade de reciclar resíduos agrícolas e/ou industriais tem motivado cada vez mais pesquisas, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, através do desenvolvimento de aplicações adequadas aos mesmos. Muitos resíduos podem ser utilizados da forma como são gerados, outros necessitam diferentes tratamentos para potencializar suas características.

É de consenso geral que o desenvolvimento sustentável requer construir usando menos materiais, e/ou substituir as matérias-primas naturais por resíduos, de forma a impactar menos sobre a natureza. Por outro lado, não se pode abdicar da qualidade do novo produto gerado e, principalmente, de sua durabilidade.

No ano de 2013, entrou em vigor no Brasil a Norma de Desempenho (NBR 15.575:2013). Esta norma foca nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas devem ser construídos. Entretanto, quanto às questões de sustentabilidade, a norma apresenta alguns itens, porém não contempla a utilização de resíduos na construção civil.

Ao longo de mais de 20 anos, o Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação – NORIE, vinculado à UFRGS, vem desenvolvendo pesquisas que contemplam a utilização de resíduos das mais diferentes maneiras dentro das matrizes à base de cimento, tais como Silveira (1996), Curutchet (1998), Ferreira (1999), Gonçalves (2000), Cassal (2000), Sensale (2000), Moura (2000), Masuero (2001), Mancio (2001), Leite (2001), Geyer (2001), Geyer (2001), Gumieri (2001), Vieira (2003), Souza (2003), Brehm (2004), Abreu (2004), Polisseni (2005), Vargas (2006), Pouey (2006), Silveira (2007), Recena (2011), Cordeiro (2013), Giordani (2014), Petry (2015), entre outros.

John (2000), em sua tese de livre docência, propõe uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento, com uma abordagem teórica, conduzindo o processo de pesquisa visando a transformação de um resíduo em material de construção. John (2000) propõe várias etapas, que iniciam com a identificação e quantificação dos resíduos, seleção do resíduo a ser investigado,

caracterização, aplicação, desenvolvimento do produto, avaliação do produto, análise de desempenho ambiental e transferência da tecnologia.

Ao se investir na pesquisa de um resíduo com potencial de utilização em matrizes de base cimentícia, diferentes aspectos devem ser contemplados, como apresentam John e Zordan (2001). Os autores relacionam, na metodologia por eles proposta, a necessidade de serem atendidos na investigação os seguintes tópicos: a geração dos resíduos, a sua caracterização, a seleção das possíveis aplicações, o desenvolvimento do produto, a avaliação do produto e a transferência de tecnologia. Ainda, no desdobramento dos tópicos da metodologia proposta por John e Zordan (2001), também devem consideradas questões tais como o volume de resíduos gerado, a variabilidades destes, aspectos ambientais, a análise do ciclo de vida, entre outros. Neste contexto, destaca-se como de fundamental importância o conhecimento do resíduo, obtido através de sua caracterização química e física.

Os dois trabalhos apresentados, tanto o de John (2000), quanto o de John e Zordan (2001), visam uma metodologia com abordagem teórica para o emprego do resíduo. Já o presente trabalho visa propor uma metodologia prática para o emprego de resíduos em produtos de base cimentícia.

Consequentemente, para que seja possível a inserção de um determinado resíduo em uma matriz de cimento Portland, há a necessidade de que se realize uma investigação exaustiva no sentido de se conhecer as características do resíduo, em nível macro e microestrutural. Isto porque, além desse conhecimento possibilitar o direcionamento do resíduo à aplicação mais viável, também permite antever possíveis efeitos deletérios que possam resultar da combinação do resíduo com o cimento Portland. Neste sentido, a metodologia prática proposta neste trabalho para o estudo de resíduos dos quais se tem pouca ou nenhuma informação, visa orientar o usuário, de forma sistematizada, a focar a investigação a partir da composição química e mineralógica do resíduo quanto do cimento Portland. Ao seguir o fluxograma, busca-se identificar na combinação resíduo-cimento a possibilidade de ocorrerem comportamentos adversos, propondo-se alternativas para a avaliação.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é a apresentação de uma metodologia prática de avaliação, para testar a viabilidade de utilização de resíduos com potencial de uso em matrizes cimentícias do ponto de vista ambiental e da durabilidade dos elementos construtivos.

2. Levantamento do Conhecimento e Sistematização

O trabalho compreende duas etapas distintas: a primeira, um estudo exploratório, visando a identificação de resíduos já pesquisados, a seleção destes, a identificação da composição química, o comportamento em matrizes cimentícias e o levantamento de ensaios utilizados para avaliar os processos de degradação em matrizes cimentícias. A segunda etapa consiste na elaboração de fluxogramas, orientando os ensaios a serem realizados em função da presença ou não de determinado composto ou elemento, que pode vir a causar problemas, principalmente de durabilidade, nas matrizes cimentícias. A representação esquemática do passo-a-passo da pesquisa é apresentada na Figura 1.

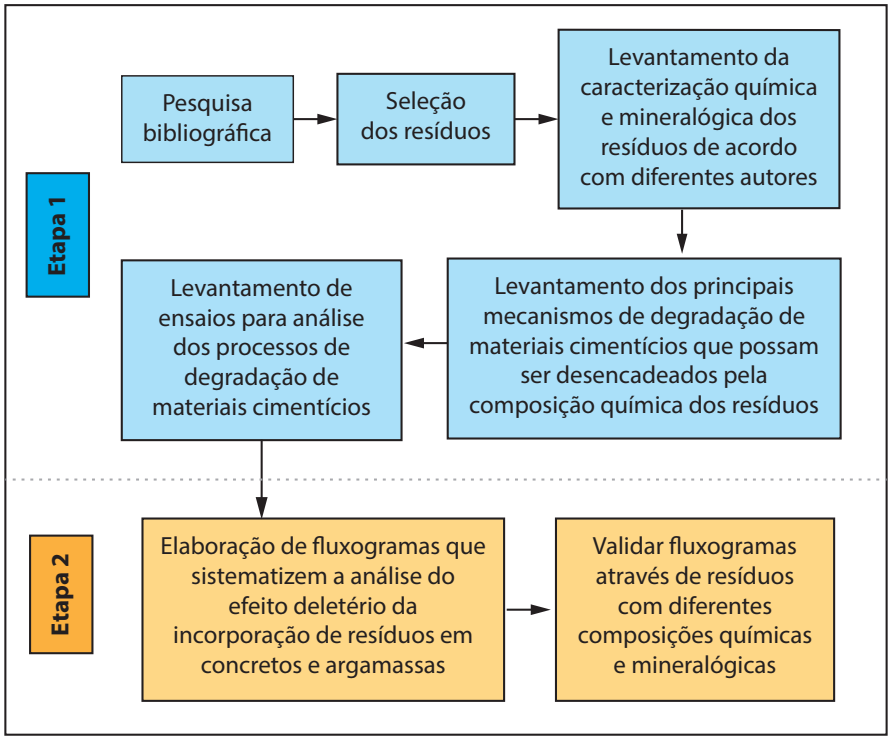


Figura 1. Diagrama das etapas da pesquisa.

2.1. Etapa 1 - Estudo Exploratório

Através de pesquisa bibliográfica foi levantado o maior número possível de estudos que envolveram a utilização de resíduos, tanto em concretos como em argamassas. Nesse estudo inicial foram identificados pelo menos 37 resíduos (Tabela 1), que foram pesquisados e encontraram-se em diferentes níveis de aprofundamento.

Tabela 1. Relação de resíduos com possibilidades de utilização em matrizes cimentícias, conforme bibliografia (GEYER, 2001; MASUERO et al., 2001; VARGAS, 2002; GONÇALVES et al., 2002; SOUZA, 2003; DELLA et al.; 2006, entre outros).

Resíduo	Resíduo	Resíduo
1. Areia de fundição – não fenólicas	**15.** Fibra de garrafa PET – polietileno terefitalado	**26.** Resíduo de tijolo refratário dolomítico
2. Borracha de pneu	**16.** Fibra de bambu	**27.** Resíduo de gesso
3. Cinza do bagaço de cana de açúcar	**17.** Fluffy (siderurgia)	**28.** Resíduo da produção de biodiesel
4. Cinza de carbureto	**18.** GRITS (resíduos da ind. de celulose)	**29.** Resíduo da estação de tratamento de água
5. Cinza de casca de arroz	**19.** Lama vermelha	**30.** Resíduo de contrafortes
6. Dregs (resíduos da ind. de celulose)	**20.** Lodo de anodização	**31.** Resíduo de beneficiamento de rocha de ágata
7. Escória de aciaria elétrica	**21.** Lodo ETE – resíduo da estação de tratamento de esgoto	**32.** Resíduo de construção e demolição (RCD)
8. Escória de alto forno	**22.** Lodo ETA – resíduos da estação de tratamento de água	**33.** Serragem cromada
9. Escória de aciaria LD	**23.** Metacaulim	**34.** Serragem de madeira
10. Escória inoxidável	**24.** Pó de aciaria	**35.** Sílica ativa
11. Escória de fundição	**25.** Pó de corte de mármore e granito	**36.** Vidro reciclado
12. Escória de cobre		**37.** Sinter feed (resíduo de minério de ferro)
13. Escória de ferro-cromo		
14. Fibra de côco		

Tendo como referência as pesquisas realizadas (LEITE, 2001; MANCIO, 2001; ZARDO et al., 2004; RODRIGUES, 2008; entre outros), e as características químicas e físicas dos diferentes resíduos, estes foram agrupados conforme sua possibilidade de emprego nas matrizes cimentícias. A Tabela 2 apresenta a classificação proposta.

Tabela 2. Classificação dos resíduos conforme sua possibilidade de utilização em matrizes cimentícias.

Possibilidade de utilização	Resíduo	
Adição mineral Pozolanas e/ ou fíler*	– Sílica ativa; – Cinza volante; – Metacaulim; – Cinza de cana-de-açúcar; – Pó de corte de mármore e granito; – Cinza de pó de madeira; – Cinza de lodo ETE – resíduo da estação de tratamento de esgoto; – Cinza de lodo ETA – resíduos da estação de tratamento de água;	– Cinza de casca de arroz; – Pó de aciaria; – Escória de alto forno; – Escória de aciaria; – Escória de cobre; – Escória inoxidável; – Escória ferro-cromo; – Escória de fundição; – Pó de rolagem de ágata; – Pó de pneu;
Agregados	– Escória de alto forno; – Escória de aciaria; – Escória de cobre; – Escória inoxidável; – Escória ferro-cromo; – Escória de fundição; – Resíduo de ágata;	– Resíduo de mármore; – Resíduo de granito; – Resíduo da construção e demolição; – Vidro reciclável – Contraforte; – Pneu.
Fibras	– Contraforte; – Fibra de bambu; – Fibra de pet; – Fibra de côco;	– Fibra de cana-de-açúcar; – Fibra de sisal; – Pneu.

* Dependendo do tipo de calcinação e resfriamento adotado, o material poderá apresentar características pozolânicas ou de fíler.

Entende-se que as investigações devam ser conduzidas no sentido de identificar, nos resíduos, elementos ou compostos (p. ex. $CaO_{livre,}$ MgO (periclásio), SiO_2, K, Na, Cl, Zn) que, mesmo em menores proporções ou

traços, possam vir a impactar de forma negativa nas reações de hifratação do cimento, podendo alterar sua pega e endurecimento, comprometer a resistência em idades mais avançadas e a durabilidade do produto obtido. Pode ocorrer também de compostos ou elementos presentes no resíduo, mesmo que em teores bastante reduzidos, somados aos constituintes do cimento, totalizarem valores além de um máximo admissível no aglomerante, argamassa ou concreto.

Destaca-se ainda, que na investigação devem ser contemplados ao máximo os aspectos inerentes a cada resíduo, tais como a variabilidade do processo que leva à geração deste, possíveis regionalidades, entre outros.

Para a caracterização do resíduo, análises por fluorescência de raios-X (FRX) e por difração por raios-X (DRX), para identificar os elementos presentes e a mineralogia da fração cristalizada, respectivamente, são os ensaios inicialmente mais utilizados. Porém, análises químicas específicas e análises mais complexas podem vir a ser importantes para o conhecimento do resíduo e de fenômenos envolvidos no processo de pega e endurecimento da mistura deste com o cimento. Citam-se, entre outras, a espectrofotometria por absorção atômica, análise térmica (TG/DTA), análise petrográfica, microscopia eletrônica de varredura, no modo elétrons secundários ou retroespalhados, que podem ser usados em conjunto em EDS ou WDs, análise granulométrica a laser, superfície específica por adsorção de nitrogênio (BET) e porosimetria por intrusão de mercúrio. As técnicas de análise são utilizadas sempre em associação, de forma complementar.

Após a identificação dos resíduos, foram organizadas planilhas nas quais reuniram-se os resultados de caracterização química encontrados por diferentes autores. A tabela 3 apresenta características químicas de alguns dos resíduos pesquisados. Esses valores, expressos na tabela 3, representam faixas aproximadas, que podem ser encontradas nestes resíduos, uma vez que existe uma variabilidade em função da origem e do tempo.

Tabela 3. Composição química de resíduos pesquisados.

Composição (%)	Sílica ativa[1,2]		Cinza de casca de arroz (CCA)[3,4]		Escória aciaria EAE[5,6]		Escória de cobre[7]	Resíduo corte granito e mármore[8,9]		Resíduo de ágata[10,11]		Cinza de bagaço de cana[12,13]	
SiO_2	96,00	95,10	90,98	72,10	16,08	16,47	26,00	59,62	68,88	97,060	90,87	83,707	77,30
Al_2O_3	0,06	0,09	0,30	0,10	7,22	5,76	3,3	12,77	15,98	1,850	1,46		5,40
Fe_2O_3	0,04	0,10	0,15	0,09	30,36	31,02	55,00	9,49	3,59	0,067	3,92	6,537	8,10
CaO	0,17	0,24	0,43	0,31	29,81	37,78	2,00	4,83	1,54	0,137	1,19	1,18	1,6
MgO	< 0,10	0,44	0,70	0,37	7,18	4,81	2,70	1,96	-	-		-	1,4
TiO_2	0,01	-	0,05	0,01	0,43	-	0,5	-	-	-	0,26	1,16	2,2
Na_2O	0,51	0,22	0,50	0,02	-	0,06	1,10	2,72	2,42	0,141	-	-	
K_2O	0,49	0,93	0,72	2,11	-	0,02	0,6	5,3	4,82	0,140	-	6,15	4,0
SO_3	-	-	nd	nd	0,24	0,34	-	0,03	-	0,038	0,29	0,68	-
P_2O_5	-	-	0,60	0,50	0,46	0,76	-	-	-	-	-	-	-
CaO(livre)	-	-	-	-	0,97	0,24	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	0,22	-	3,14	-	0,1	-	-	-	0,10	0,081	-
Fe_30_4	-	-	-	-	-	-	7,00	-	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	1,40	-	-	-	-	-	-
$As_2\,0_3$	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-
$Sn0_2$	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-
$Mo0_3$	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	0,05	0,037	-
Cr_20_3	-	-	-	-	2,14	-	0,1	-	-	-	-	0,094	-
Rl	-	-	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C (total)	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perda ao fogo	1,80	2,32	24,3	2,63	-	-	-	-	-	0,570	1,82	-	-

Obs: (1) Barata, 1998; (2) Hoffmann, 2001; (3) Martinez et al., 2009; (4) Della et al., 2006; (5) Masuero, 2001; (6) Polese et al., 2006; (7) Moura, 2000; (8) Neves et al., 1999; (9) Gonçalves, 2000; (10) Chiaro et al., 2013; (11) Petry, 2015; (12) De Paula et al., 2009; (13) Zardo et al., 2004.

A tabela 4 apresenta as fases presentes identificadas, em geral, em análise por difração de raios-X

Tabela 4. Compostos identificados (fases) em resíduos pesquisados, exemplos.

Escória de aciaria elétrica (EAE)[1]	**Resíduo de corte de granito (RCG)[2]**	**Escória de aciaria LD (EALD) resfriada lentamente[3]**	**Escória de aciaria LD (EALD) resfriada bruscamente – usina[3]**
Periclase - MgO	Anordita - $CaAl_2SiO_2O_8$	larnita - β2CaO.SiO_2	bredigita – α'C2S
Wustita - FeO	Microclino - $KAlSi_3O_8$	óxido de cálcio livre - CaO	silicato tricálcico – C_3S
Wollastonita - $CaSiO_3$	Muscovita - $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	hidróxido de cálcio - Ca(OH)2	silicato de cálcio e manganês - Mn0,8Ca0,2SiO_3
Óxido de Cálcio - CaO	Quartzo - SiO_2	calcita - $CaCO_3$	ferrita dicálcica - 2CaO.Fe_2O_3
Larnita - Ca_2SiO_4	Tremolite - $(Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2)$	ferrita dicálcica - 2CaO. Fe_2O_3	óxido de ferro e magnésio – $Mg_{1-x}Fe_xO$
Clinocloro - $(Mg,Al,Fe)_4O_{10}(OH)_8$		wustita - FeO	óxido de cálcio, magnésio e ferro - $Ca_2MgFe_2O_6$;
		hematita - Fe2O3	ferro metálico – Fe0.
		óxido de cálcio, alumínio e ferro - $CaAl_8Fe_4O_{14}$	
		hausmannita - (Mn,Mg)(Mn,Fe)2O4;	
		periclásio - MgO	
		ferro metálico - Fe^0	

(1) Masuero et al., 2004; (2) Gonçalves et al., 2002; (3) Gumieri, 2002.

Pela importância que tem a composição química do resíduo para compor misturas com cimentos, as consequências ou efeitos da presença de determinados compostos ou traços nas misturas são apresentadas na sequência.

Na Tabela 3, verifica-se que pode ocorrer uma grande diferença da composição química dos resíduos, como por exemplo, a cinza de casca de arroz. Esta variabilidade pode ser atribuída à forma de obtenção da cinza, mais especificamente tempo e temperatura de queima. No resíduo de corte de granito, observa-se o teor de K elevado em relação aos demais resíduos apresentados na Tabela 3. No resíduo de ágata, o teor de Si; e assim por diante. Entretanto, a presença de determinado elemento não significa dizer que o resíduo é inadequado para uso em matrizes com cimento. É necessário que se identifiquem a(s) fase(s) na(s) qual(is) determinado elemento químico é encontrado no resíduo. Pode ocorrer de o elemento químico ser constituinte de fases estáveis para as condições de aplicação pretendida para o resíduo e, nesta condição, não seria prejudicial à matriz cimentícia. Assim, na Tabela 4 são apresentados exemplos de caracterização mineralógica.

Com as informações reunidas e tendo em conta aspectos como os relacionados anteriormente, realizou-se a segunda etapa da pesquisa, que corresponde à elaboração de uma metodologia de avaliação.

Pretende-se ampliar a aplicação desta medodologia, que será apresentada a seguir, para o maior número possível de resíduos, deste modo deseja-se realizar uma catalogação destes materiais e disponibilizá-la, afim de difundir as pesquisas realizadas. Esta disponibilização será a partir de fichas catalográficas que conterão a aplicação da metodologia e informações que se façam pertinentes. A figura 2 demostra como pretende-se catalogar essas informações.

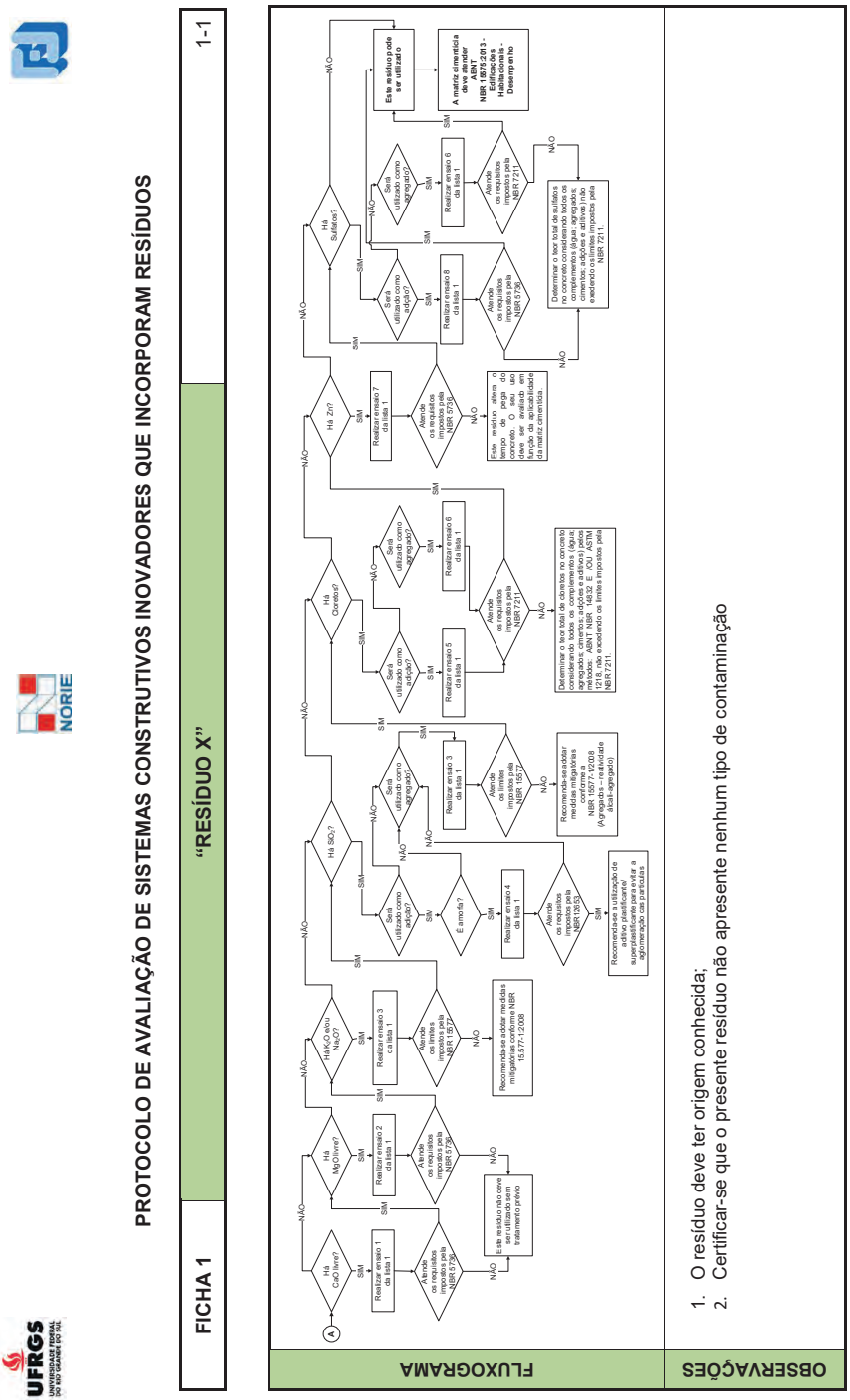


Figura 2. Modelo de Ficha catalográfica de resíduos.

2.1.1. Efeitos Deletérios Causados pelos Compostos

Devido à grande diversidade de resíduos disponíveis com potencial de uso em concretos e argamassas, foi realizada uma seleção, optando-se por usar como referência para a estruturação da metodologia os que apresentassem uma caracterização mais completa na bibliografia. Isso possibilitou a identificação dos compostos usualmente mais frequentes nos resíduos, cuja presença na matriz cimentícia pode ser deletéria.

Como comentado anteriormente, no levantamento bibliográfico, foi constatado que existe uma grande variedade de trabalhos disponíveis a respeito do reaproveitamento de resíduos na construção civil no Brasil e fora do pais. Entretanto, em muitos destes, o foco está voltado para a obtenção de produtos e seus desempenhos mecânicos destes. Nestes casos, a caracterização do resíduo utilizado normalmente, ou é mínima ou não informada.

A presença de determinados compostos ou elementos nos resíduos pode ser extremamente prejudicial às matrizes cimentícias, pois estes podem reagir com os compostos químicos do aglomerante, com seus produtos de hidratação e/ou com os agregados presentes. Assim, são descritos brevemente alguns dos principais compostos e seu efeito na matriz cimentícia.

2.1.1.1. Óxido de Cálcio Livre (CaO livre) e Periclásio (MgO)

Ao se hidratar, o óxido de cálcio livre forma a portlandita ($Ca(OH)_2$), cuja reação é acompanhada de aumento de volume na ordem de 97,6% (CENTURIONE, 1993). No clínquer, o óxido cálcio livre (CaO_{livre}) é resultado de deficiências no processo de obtenção deste, podendo estar associado a problemas de moagem ou homogeneização da matéria prima, ou ainda, da dosagem excessiva do óxido de cálcio na farinha. Assim, o óxido de cálcio livre é um parâmetro de controle no processo de fabricação do clínquer, que se apresenta, em média, no teor de 1%. Entretanto, o óxido de cálcio livre pode ser encontrado também em resíduos como, por exemplo, nas escórias siderúrgicas.

O óxido de magnésio (periclásio) aparece no clínquer como fase mineralógica, e tem como fonte os calcários magnesianos utilizados como matéria prima. Segundo Centurione (1993), na formação do clínquer, o óxido de magnésio presente na farinha tem participação na formação de diferentes fases do clínquer, principalmente na alita, substituindo o CaO. Caso o teor de MgO seja superior a 2%, aproximadamente, o material excedente se cristalizará sob a forma de periclásio (CENTURIONE, 1993). O óxido de magnésio reage mais lentamente, sendo responsável pela expansão em longo

prazo (SERSALE, 1986[1]; SHOUSUN, 1980[2] citados por MASUERO et al., 2004). De forma similar ao óxido de cálcio livre, o óxido de magnésio pode estar presente também nas escórias siderúrgicas.

A figura 3 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de CaO_{livre}.

A norma brasileira de referência para especificação de cimento Portland comum estabelece o limite máximo 6,5% para o MgO, sendo que os ensaios utilizados para realizar esta determinação são estabelecidos pelas NBR NM 14:2012.

A identificação da presença de CaO_{livre} e MgO pode ser feita, entre outros, através de ensaios químicos, análise térmica e análise de difração de raios-X.

Para estudo da expansão pode ser utilizado o método proposto pela norma NBR 11582:2012 - Determinação da Expansibilidade Le Chatelier, que quando realizada a frio, relaciona a expansão à presença de CaO_{livre}, enquanto no processo a quente visa à identificação da presença do MgO. Entretanto, ao se realizar apenas o ensaio a quente, o aumento de volume também pode ser atribuído à presença de CaO livre. Outros métodos de avaliação da expansibilidade podem ser encontrados em Gumieri (2002), Moura (2000) e Masuero (2001).

Gumieri (2002), ao estudar escórias de aciaria LD, destaca a importância de se avaliar, além das características químicas, também a granulometria e dimensão máxima característica do material, sua superfície específica e idade. A autora considera ainda que cada método de ensaio seria mais adequado para avaliar um parâmetro específico, ao invés do conjunto de parâmetros causadores da expansão.

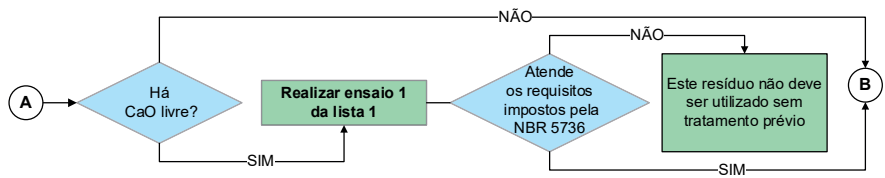


Figura 3. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de CaO_{livre}.

1 SERSALE, R. et al. Chracterization and potencial uses of steel slag. *Silicates Industriels*, Bruxelles,v.51, p.163-170, 1986.

2 SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: International Symposium On The Chemistry Of Cement, 7., 1980. *Proceedings*... Paris, 1980. p. 25-30.

A figura 4 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de MgO_{livre}.

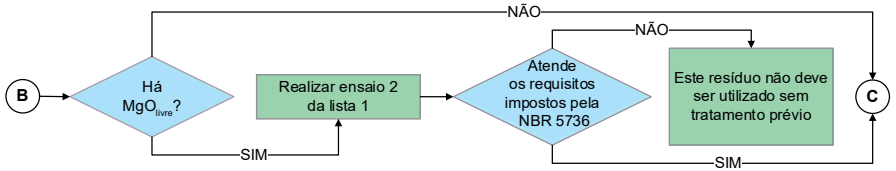


Figura 4. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de MgO_{Livre}.

2.1.1.2. Álcalis (Na_2O e K_2O)

No clínquer, os álcalis têm origem nos materiais argilosos contendo, entre outros, partículas finas de feldspatos, mica e ilita. Na fabricação do cimento, podem ocorrer também nas cinzas de carvão utilizado como combustível. Além de maior potencialidade de ocorrerem reações expansivas tipo álcali-agregado, são atribuídos à presença de compostos alcalinos variações dos tempos de pega dos cimentos, empelotamento dos mesmos, formação de manchas no concreto, modificações no endurecimento (BLODA, 1967[3], citado por CENTURIONE, 1993). O teor de álcalis nas pozolanas, como por exemplo, na cinza de casca de arroz, pode ser elevado e varia conforme a procedência da mesma (ABREU, 1998; KULAKOWSKI, 2002; SILVEIRA, 2007; RODRIGUES, 2008), assim como no caso da cinza de bagaço de cana (FRIAS et al., 2011). Porém, se o mineral contendo álcalis não é solúvel em ambientes de elevado pH, este não deve causar problemas em misturas contendo cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Para a identificação da presença dos elementos Na e K em resíduos podem ser utilizados ensaios como a fluorescência de raios-X. A determinação do teor de álcalis pode ser feita também por fotometria de chama utilizando a norma NBR 17:2012, prescrita para o cimento.

A figura 5 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de K_2O e/ou Na_2O.

3 BLODA, A.V. El problema de los álcalis em la concción del cemento Portland. *Cemento Hormigón*, Barcelona, v. 35, n. 5, set. 1967. p. 433-452.

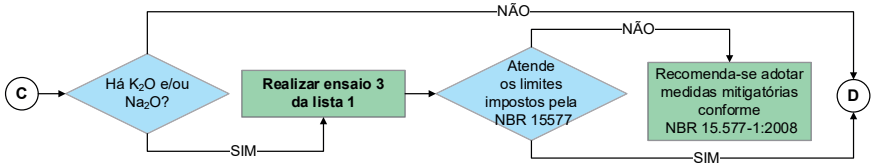


Figura 5. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de K_2O e/ou Na_2O.

2.1.1.3. Dióxido de Silício (SiO_2)

O dióxido de silício apresenta-se de várias formas, que são: quartzo, quartzito, tridimita, critobalita e opala. Dependendo da forma como encontra-se no agregado, este pode reagir com os álcalis do cimento, formando um gel que, na presença de água, expande, afetando a integridade das estruturas de concreto. Esta reação é denominada, na literatura, de reação álcali-sílica e/ou álcali-silicato.

As rochas ou resíduos que desencadeiam a reação álcali-sílica apresentam formas bem definidas como a sílica metaestável (tridimita e critobalita), sílica microcristalina amorfa (opala) e a sílica sob a forma de quartzo criptocristalino, considerada a forma mais desordenada e reativa (chert, flint e calcedônia) (PAULON, 1981).

A reação álcali-silicato é propiciada por minerais reativos que apresentam o retículo cristalino deformado, dessa forma o quartzo é considerado um destes minerais, devido às tensões de origem geológica (TIECHER, 2006).

Assim, é necessário que se realizem ensaios de análise petrográfica, para identificar a forma como o dióxido de silício está presente no agregado que se pretende utilizar nas matrizes cimentícias.

Para analisar o potencial reativo dos agregados existem vários ensaios reconhecidos internacionalmente, sendo: análise petrográfica ASTM C295-08; NBR 15577-3:2008; NBR 7389:2009, método das barras, ASTM C227-10, método acelerado das barras, ASTM C1260-14; NBR 15577-4:2008, determinação da expansão em prismas de concreto NBR 15577-4:2008; ASTM C1293-08, entre outros.

A figura 6 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de SiO_2.

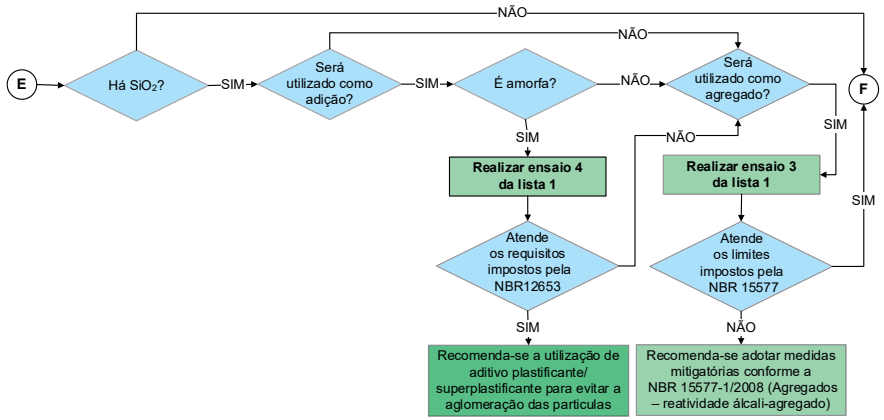


Figura 6. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de SiO_2.

2.1.1.4. Íon Cloreto – Cl^-

O efeito da presença do íon cloreto está associado diretamente à corrosão da armadura, em estruturas de concreto armado ou argamassa armada. Assim, o teor máximo admitido é rigorosamente limitado por norma, conforme a aplicação do concreto, estando os valores limites relacionados, em geral, à massa de cimento por metro cúbico de concreto.

Os valores limites para o teor cloretos podem ser encontrados nas normas NBR 7211:2009 e NBR 6118:2014. No resíduo, o teor de cloretos pode ser determinado através de ensaios como os estabelecidos na ASTM C1206-10.

A figura 7 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de cloretos.

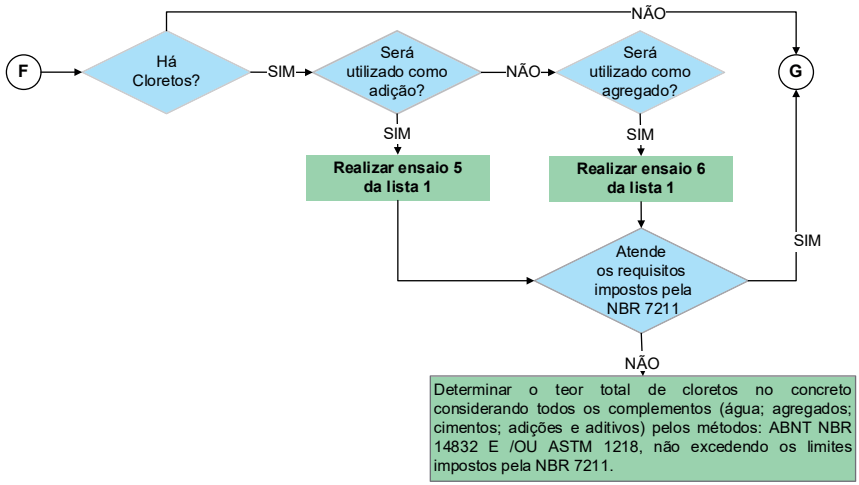


Figura 7. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de Cloretos.

2.1.1.5. Óxido de Zinco (ZnO)

O óxido de zinco (ZnO) pode ser encontrado em resíduos, como por exemplo no pó de aciaria elétrica (VARGAS, 2002).

Odler e Schmidt (1980)[4], citados por Maringolo (2001), afirmam que óxido de zinco em teores de até 0,5% no clínquer pode ser acomodado no processo de fabricação. Porém, teores superiores a 1% podem comprometer a hidratação, retardando-a, além de reduzir as resistências iniciais [ODLER e ABDUL-MAULA, (1980a[5],b[6]); KNÖFEL, (1978)[7], citados por MARINGOLO (2001)]. A reação de retardamento da hidratação foi

4 ODLER, I; SCHMIDT, O. Structure and properties of Portland cement clinker doped with zinc oxide. *Journal of American Ceramic Society*, Ohio, USA, p. 13-16, 1980.

5 ODLER, I.; ADBUL-MAULA,S. *Effect of mineralizers on the burning process of Portland cement clinker*, Part 1: Kinectics of the process. Zement-Kalk-Gips, Wiesbaden, n. 3, p. 132-136, 1980a.

6 ODLER, I.; ADBUL-MAULA,S. *Effect of mineralizers on the burning processo of Portland cement clinker, Part 2*: Mode of action of mineralizerss. Zement-Kalk-Gips, Wiesbaden, n. 6, p. 278-282, 1980b.

7 KNÖFEL, D. *Modifying some properties of Portland cement clinker and Portland cement by means of ZnO and ZnS*. Zement-Kalk-Gips, Wiesbaden, v. 31, n. 3, p. 157-161, 1978.

demonstrada por Arlinguie et al. (1982, 1990), que atribuem o fenômeno à formação do hidróxido de zinco e sua conversão a uma forma cristalina ao redor dos grãos anidros. Miller (1976)[8], segundo Maringolo (2001), registrou a formação de um composto intermediário complexo de zincato hidratado de cálcio (CaZn2(OH)6.2H2O), que inibe a hidratação da alita.

Para os estudos de misturas de cimento com resíduos, o efeito da presença de Zn pode ser identificado pela norma NM9:2003 - Determinação dos tempos de pega de concretos e argamasas por meio de resistência à penetração. Porém algumas vezes ocorre um ressecamento superficial da pasta de cimento, o que pode mascarar o resultado. Recomenda-se realizar um ensaio de calorimetria. Vargas (2002) ressalta que o emprego do ensaio prescrito pela NBR 11581, para determinação de tempo de pega das pastas de cimento, não se mostra adequado, sugerindo o emprego de ensaios de determinação do calor de hidratação.

Deve-se levar em consideração a aplicação que se deseja para a matriz cimentícia com a utilização de resíduo com zinco, visto que dependendo de onde for usada, o retardamento da pega pode vir a ser benéfico.

A figura 8 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de zinco.

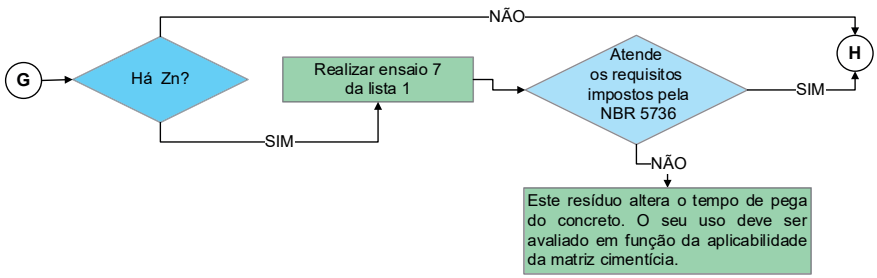


Figura 8. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de zinco.

8 MILLER, F. M.. Minor elements in cement clínquer. In: PCA Cement Chemist's Seminar, 1976. *Proceedings*... Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 1976.

2.1.1.6. Trióxido de Enxofre (SO_3)

No clínquer, o enxofre tem origem na matéria prima onde normalmente se apresenta na forma de sulfetos (pirita, marcassita), podendo também ser resultante de impureza do combustível (CENTURIONE, 1993). Quando na fabricação, causa problemas na formação do clínquer bem como leva à incorporação de sulfatos alcalinos ao produto formado. Conforme Duda (1977)[9], citado por Centurione (1993), a evolução das resistências mecânicas do cimento se reduz consideravelmente em presença de sulfatos alcalinos, além do risco elevado de ocorrência de fissuras por expansões geradas após o endurecimento da matriz cimentícia.

Um ensaio de desempenho acelerado foi desenvolvido pelo *Laboratoire Central de Ponts et des Chaussées* (LCPC) em parceria com outras associações para avaliar a durabilidade conjunta com relação à dosagem e ao aquecimento do concreto frente à formação da etringita tardia, seguida de expansão. O ensaio, além de avaliar a dosagem do concreto, determina a reatividade potencial na formação de etringita tardia, com combinação de parâmetros admissíveis para evitar o fenômeno (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

No agregado, a determinação de sulfatos solúveis, bem como de cloretos e outros sais, pode ser realizada segundo a NBR 9917:2009.

A figura 9 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de sulfatos.

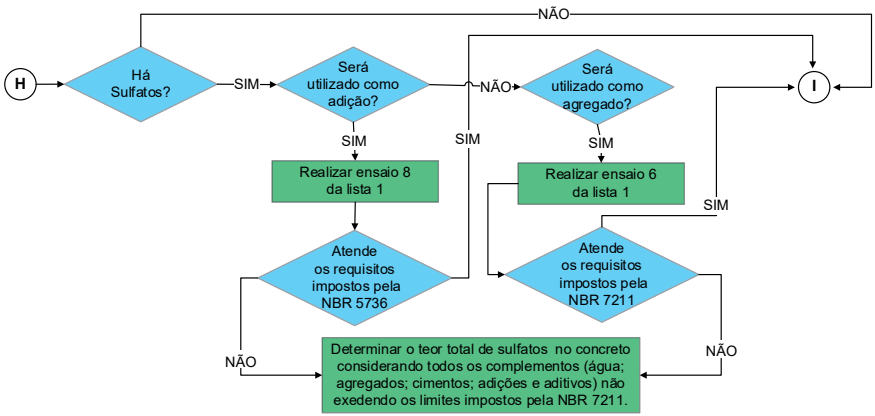


Figura 9. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de Sulfatos.

9 DUDA, W. H. *Cemente data book*. Berlin: Bauverlag Gmb. 1977.

2.1.1.7. Óxido de Ferro (FeO)

O óxido de ferro é um material que pode ser encontrado em resíduos tais como as escórias de aciaria, corte de mármore e granito, entre outros.

Dependendo da fase em que este mineral se encontra pode gerar mecanismos de expansão, deteriorando a matriz produzida. Esta expansão é ocasionada devido à oxidação ou à corrosão do ferro metálico (Fe^0) presente em sua composição (MANCIO, 2001).

A expansão das escórias por oxidação do ferro ocorre principalmente devido à mudança do ferro do estado Fe^{+2} para o estado Fe^{+3}, a partir de reações com o oxigênio do ar (MANCIO, 2001 e MASUERO, 2001).

A expansão provocada pela oxidação do ferro metálico gera um aumento em volume que pode ser de até 600% (MEHTA e MONTEIRO, 2013).

Para a detecção da expansão causada pelo óxido de ferro recomenda-se utilizar o ensaio EN 1744/98, por realizar a aceleração das reações com vapor de água. É o que apresenta as melhores condições para a verificação da expansão devida à oxidação do ferro (MANCIO, 2001).

Deve-se ressaltar que não são todas as fases deste mineral que irão desencadear os mecanismos de expansão. Sabe-se que o Fe_2O_3 é importante tanto para materiais considerados pozolânicos quanto para materias considerados cimentantes. A wustita é a fase que propicia as maiores expansões, uma vez que através de reações de oxidação se transforma em compostos de maior volume, apesar da tendência de formar uma solução sólida com manganês e magnésio, devido a altos teores de ferro (SERSALE, 1986, citado por MASUERO et al. 2001)[10].

A figura 10 ilustra detalhe do fluxograma, onde destaca-se a análise decorrente da presença de compostos a base de ferro.

10 SERSALE, R. et al. Chracterization and potencial uses of steel slag. *Silicates Industriels*, Bruxelles, v.51, p.163-170, 1986.

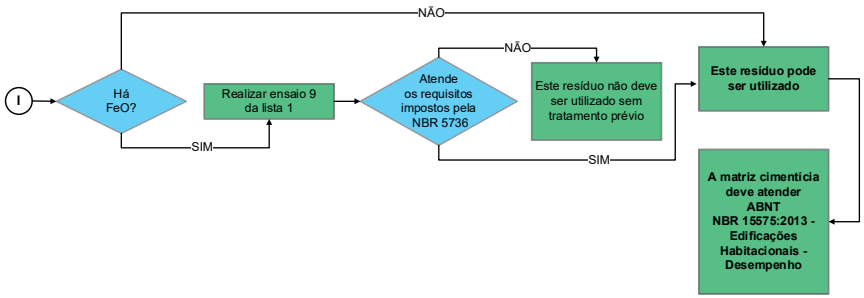


Figura 10. Detalhe do fluxograma, destacando-se a análise decorrente da presença de Óxido de Ferro.

2.2. Etapa 2 – Fluxogramas

A metodologia para a análise do potencial deletério de resíduos visando a sua utilização em matrizes cimentícias foi sistematizada na forma de fluxogramas (Figuras 11 a 14), através dos quais é possível avaliar o desempenho técnico do resíduo em função da sua classificação ambiental, e relacionar a composição química com a durabilidade.

O primeiro passo, considerando um resíduo qualquer, é a sua caracterização ambiental. Na sequência, as composições química e mineralógica do resíduo em estudo são necessárias para a continuidade da investigação. A indicação da viabilidade ou não do uso do resíduo, na matriz cimentícia, é o resultado obtido ao final do fluxograma.

2.2.1. Como Utilizar o Fluxograma

Para iniciar a análise do resíduo, primeiramente é realizada a sua caracterização do ponto de vista ambiental e quanto ao risco à saúde pública, segundo o fluxograma que consta na NBR 10004:2004 (Figura 11). A classificação dos resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (NBR 10004:2004).

Logo, o primeiro questionamento é sobre a origem do resíduo, se este apresenta origem conhecida e consta no anexo A ou B da NBR 10004:2004, ou se não tem origem conhecida e apresenta alguma característica como

inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Neste caso o resíduo é considerado perigoso, isto é, apresenta risco à saúde pública e/ou risco ao meio ambiente. Aconselha-se que este tipo de resíduo não seja utilizado. Entretanto, dependendo do tipo de periculosidade que o resíduo apresente, é possível que o mesmo esteja encapsulado ou solidificado e/ou estável. Neste caso, deve ser seguido o protocolo prescrito na NBR 10005 e 10006, ambas de 2004, que consiste na análise de lixiviação e solubilização do resíduo.

Se o resíduo não constar no anexo A e B e não apresentar nenhuma das características referidas, é considerado um resíduo não perigoso. Para saber se ele é considerado inerte ou não, é preciso analisar se o resíduo possui constituintes que são solúveis em concentrações superiores ao anexo G. Se possuir, é considerado resíduo não-inerte, o que significa que pode ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Se o resíduo não apresentar concentração superior, ele é considerado resíduo inerte.

Quando o resíduo é classificado como não inerte ou inerte, prossegue-se com a caracterização deste. Na sequência, o resíduo é avaliado nos quesitos relacionados à sua composição química e possíveis efeitos deletérios, que podem se manifestar quando estes são incorporados em matrizes cimentícias. Para cada composto existe a indicação da realização de pelo menos um ensaio para detectar a alteração provocada pelo resíduo (Figuras 12 a 14).

O fluxograma está organizado inicialmente pela verificação quanto à presença de CaO_{livre}. Em caso positivo, indica-se a realização do ensaio de "Determinação de expansibilidade Le Chatelier a frio (NBR 11582:2012)", conforme Quadro 1, e, se o resultado atender aos requisitos impostos pela norma se encaminha para a próxima análise, caso contrário, aconselha-se que o material não seja utilizado sem tratamento prévio, que pode ser a estabilização dos compostos a partir de reações no tempo ou de modo acelerado.

A próxima análise é quanto ao MgO_{livre}. Se existir este composto indica-se a realização do ensaio de "Determinação de expansibilidade Le Chatelier a quente" (NBR 11582:2012), conforme Quadro 1, e, se o resultado atender aos requisitos impostos pela norma, segue-se para a próxima análise. Caso não atenda aos requisitos, aconselha-se que o material não seja utilizado sem tratamento prévio, para a estabilização dos compostos.

Após, questiona-se se há a presença de álcalis K_2O e/ou Na_2O e assim sucessivamente até o final dos fluxogramas propostos.

Caso o resíduo avaliado atenda todos os requisitos impostos no fluxograma, ao final do processo será considerado apto para ser utilizado. Na sequência, definidas as potencialidades e limitações de uso do resíduo, são investigados os possíveis e mais promissores materiais que podem ser desenvolvidos com estes resíduos. Os novos materiais produzidos precisam, então, ser caracterizados do ponto de vista ambiental, mecânico e de durabilidade uma vez que os produtos que incorporam resíduos não podem ter sua qualidade e durabilidade comprometida. Neste sentido, devem ser submetidos à avaliação segundo os requisitos da NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais - Desempenho. Caso o material ou componente com o resíduo não atenda as especificações dos ensaios que estão sendo propostos, em qualquer dos itens avaliados, o seu uso, na forma proposta, passa a ser desaconselhado.

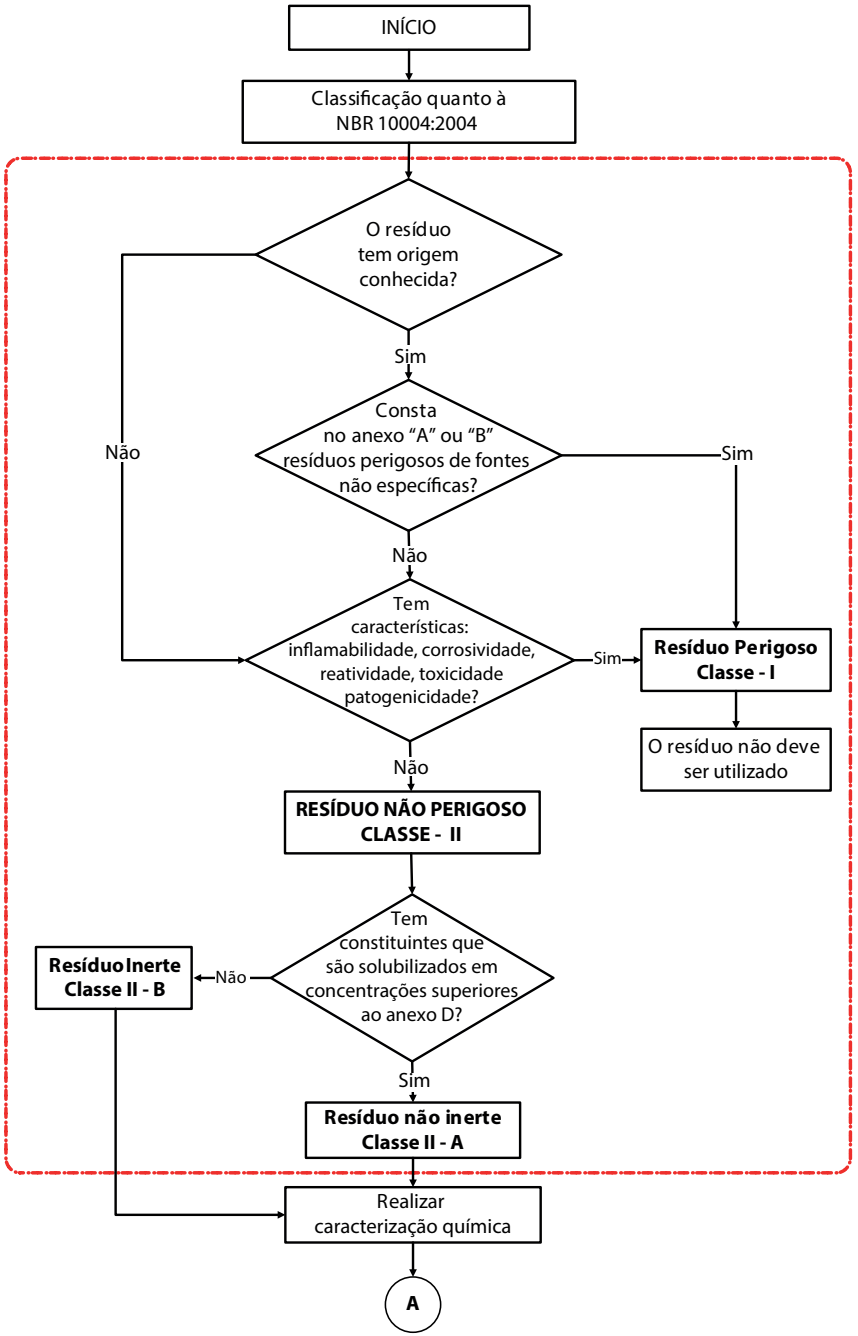


Figura 11. Fluxograma, parte 1- classificação ambiental conforme NBR 10004:2004. Fonte: NBR 10004:2004.

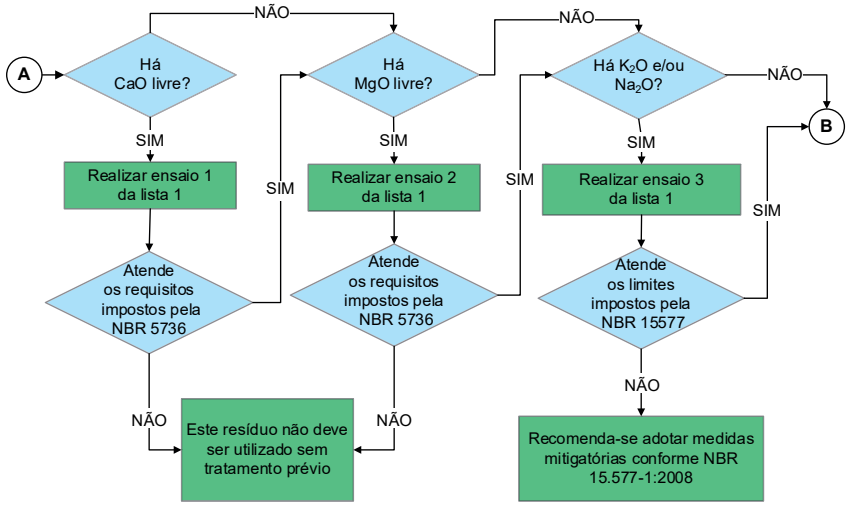


Figura 12. Fluxograma, parte 2 - Avaliação de possíveis efeitos deletérios em matriz cimentícia.

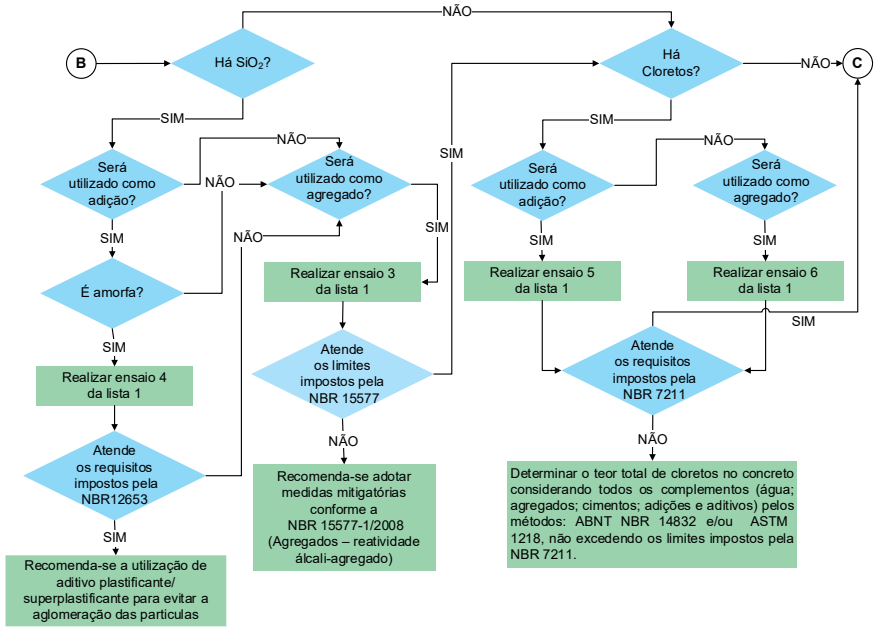


Figura 13. Fluxograma, parte 3 - Avaliação de possíveis efeitos deletérios em matriz cimentícia.

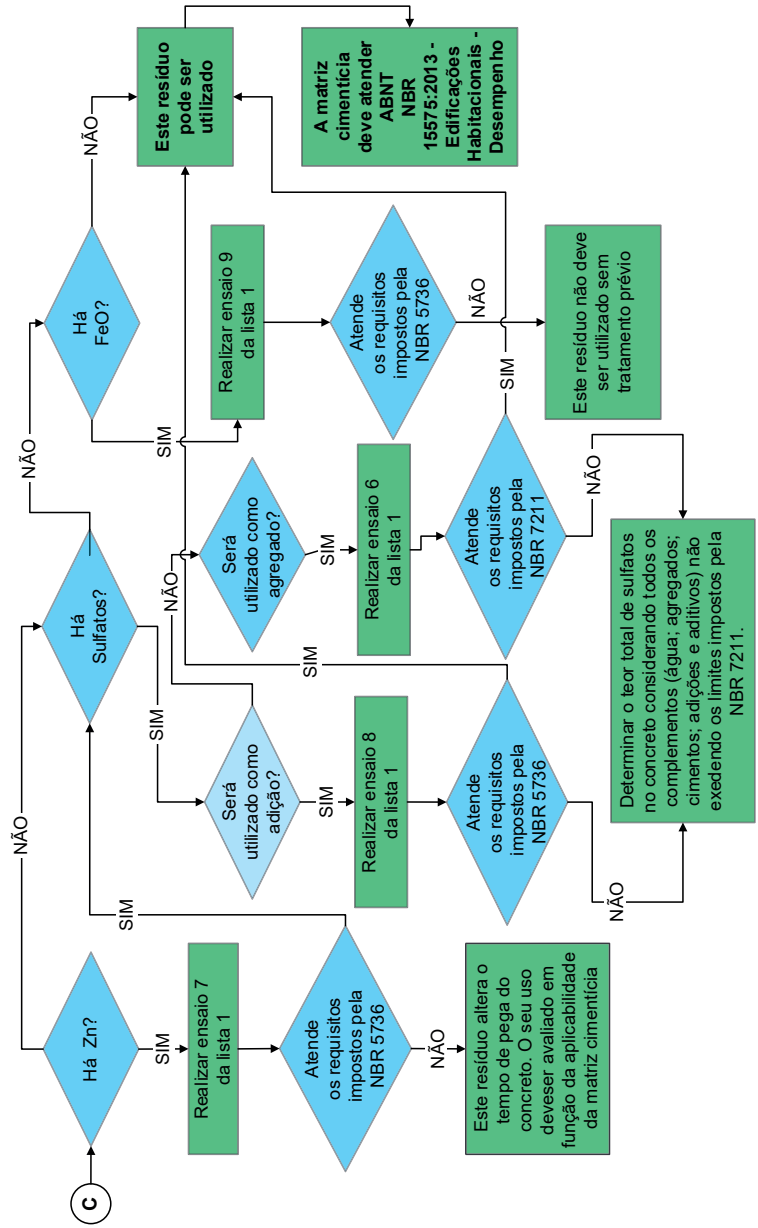


Figura 14. Fluxograma, parte 4 - Avaliação de possíveis efeitos deletérios em matriz cimentícia

Quadro 1. Lista de ensaios recomendados para avaliação de resíduos.

Lista 1 – Ensaios

Ensaio 1 – NBR 11582:2012 – Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier – Frio;

Ensaio 2 – NBR 11582:2012 – Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier – Quente;

Ensaio 3 – NBR 15577-1:2008 – Agregados –Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto;

Ensaio 4 – NBR 5751:2012 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânicas – Índice de atividade pozolânicas com cal – Métodos de ensaio.
Ou NBR 5752: 2014 – Materiais pozolânicos – Determinação de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

Ensaio 5 – NBR 14832:2002 – Cimento Portland e clínquer – Determinação de cloreto pelo método de íon seletivo.

Ensaio 6 – NBM 9917:2009 – Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis;

Ensaio 7 – NBR NM 9:2003 – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração;

Ensaio 8 – NBR NM 16: 2012 – Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico.

Ensaio 9 – EN 1744-1:2009 – Tests for chemical properties of aggregates.

3. Validação da Metodologia: Resíduo de Escórias de Aciaria Elétrica Granulada (ACGRAN)

O resíduo utilizado para a validação da metodologia proposta é uma escória de aciaria elétrica.

As escórias de aciaria são os principais resíduos gerados durante o processo de fabricação do aço, tanto em conversores a oxigênio, denominadas escórias de aciaria LD ou BOF, quanto em fornos elétricos a arco (FEA), denominadas escórias de aciária elétrica. Estima-se que a geração mundial de escórias de aciaria situe-se em torno de 65 milhões de toneladas por ano. No Brasil, a geração de escória de aciaria é de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas por ano (http://www.acobrasil.org.br).

O principal obstáculo no que se refere à utilização das escórias de aciaria como material de construção civil é a sua instabilidade volumétrica (VIKLUND-WHITE; YE, 1999).

Os teores de óxido de cálcio (CaO) livre e óxido de magnésio (MgO) livre são os fatores mais importantes a serem considerados para a utilização da escória de aciaria como material de construção, uma vez que há um amplo consenso na literatura técnica de que estes compostos são os maiores responsáveis pelas características expansivas do material, em especial em escórias de aciaria LD (COOMARASAMY; WALZAK, 1995; SSTC, 1996; MORINO; IWATSUKI, 1999; LUXÁN et al., 2000; MOTZ; GEISELER, 2001; CHESNER et al., 2001).

Para escórias de aciaria elétrica, a instabilidade volumétrica está associada principalmente ao FeO (MANCIO, 2001; MASUERO, 2001), mas também pode ser decorrente ao CaO e MgO.

Uma das formas de evitar a instabilidade volumétrica, é através do processo de resfriamento brusco (granulação). A aplicação da metodologia aqui apresentada refere-se a uma escória de aciaria elétrica que passou por esse processo.

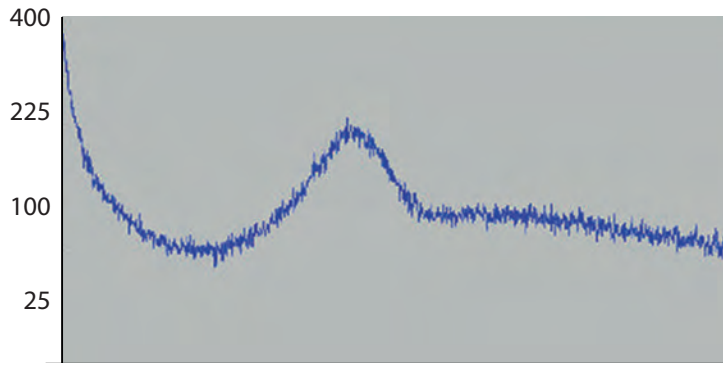
Classificação do resíduo conforme NBR 10004:2004	**Resíduo Não Inerte - Classe II A**				
Composição Química	SiO_2 – 33,08 CaO- 39,42 Al_2O_3 – 11,50 FeO – 0,81	MgO – 10,78 Na_2O – 0,001 K_2O – 0,11 TiO_2 – 0,76	MnO – 3,05 Pb_2O_5 – 0,01 V_2O_5 – 0,05 Cr_2O_3 – 0,50		
Há CaO livre?	Conforme se observa na composição química, há CaO, Desta maneira realizar ensaio 1 da lista 1.	**Ensaios realizados**	**Limite máximo encontrado**	**Limite máximo admissível**	**Avaliação**
		NBR 11582:2012	0,1	5 mm	Atende os requisitos impostos pelo NBR 5736.
		ASTM C 151	0,0016	0,8	
Há MgO livre?	Sim, ultrapassando o limite de 6,5% em massa.	ESTE RESÍDUO NÃO DEVE SER USADO SEM TRATAMENTO PRÉVIO, ENTRETANTO REALIZANDO O ENSAIO DE EXPANSIBILIDADE A FRIO NÃO OCORREU VARIAÇÃO DE ABERTURA DAS AGULHAS. ANTES DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO.			
Há K_2O e/ou Na_2O?	A QUANTIDADE DESTES COMPOSTO NO RESÍDUO É MUITO BAIXA, NÃO SENDO NECESSÁRIA VERIFICAÇÃO.				
Há SiO_2?	Sim, sendo utilizada como substituição ao cimento, por apresentar caracteristicas amorfas	NBR 5752	119%	≥ 75 %	Atende os requisitos impostos pela NBR 12653
Há FeO?	A QUANTIDADE DESTES COMPOSTO NO RESÍDUO É MUITO BAIXA (ESTADO AMORFO), NÃO SENDO NECESSÁRIA VERIFICAÇÃO.				
Há Cloretos?	NÃO APRESENTA				
Há Zn?	NÃO APRESENTA				
Há Sulfatos?	NÃO APRESENTA				
APÓS A AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS PRESENTES NESTE RESÍDUO PODE-SE CONCLUIR QUE ELE NÃO DEVE SER UTILIZADO SEM TRATAMENTO PRÉVIO, UMA VEZ QUE A QUANTIDA DE MgO É SUPERIOR AO ESTABELECIMENTO PELA NORMA BRASILEIRA.					

3.1. Exemplo do Uso da Metodologia

O resíduo utilizado para a validação da metodologia proposta é uma escória de aciaria elétrica que passou por um processo de resfriamento brusco, onde foi alterada a sua estrutura interna, passando de cristalina a amorfa.

3.2. Avaliação do Resíduo

Após a verificação do potencial deletério dos componentes da escória de aciaria elétrica, foi realizada uma caracterização complemente do ponto de vista físico, químico e ambiental, visando a utilização deste em matrízes de base cimentícia.

Ponto de vista físico	Massa Específica (kg/dm³) – 2,90 Diâmetro médio (μm) – 4,83
Ponto de vista Químico	 A partir da DFR observa-se que o resíduo é um material amorfo.
Ponto de vista Ambiental	**Resíduo Não Inerte - Classe II**

3.3. Avaliação do Composto Cimentício

O resíduo foi incorporado em argamassas como substituição ao cimento, uma vez que de acordo com as características apresentadas no item 3 e no subitem 3.1, não apresentaram nenhuma restrição quanto ao seu emprego. Desta maneira, foram testados os teores de substituição de 10%, 30% e 50% do cimento, em volume, pelo resíduo, avaliando a influência destas nas propriedades mecânicas (resistência à compressão) e durabilidade (Absorção de água por imersão e coeficientes de difusão) e do ponto de vista ambiental

das matrizes de base cimentícia. A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados. Na Figura 15, é possível observar que a incorporação do resíduo na matriz de base cimentícia é satisfatória quanto à resistência à compressão, uma vez que a substituição de até 50% não provocou alterações nesta propriedade. Na Figura 16, observa-se que a utilização do resíduo reduz a absorção de água, o que é benéfico para as argamassas. A Figura 16 b mostra, de modo geral, que o resíduo auxiliou na redução do coeficiente de difusão. Os quadros 2 e 3 tratam sobre a avaliação ambiental do resíduo inserido na argamassa, sendo que o traço utilizado para análise foi o 1:1,5 com 50% de teor de substituição de cimento pelo resíduo, em volume. Neste, é possível observar que tanto a argamassa de referência quanto a argamassa com o resíduo são consideradas não perigosas pelo ensaio de lixiviação (Quadro 2). Quanto ao ensaio de solubilização (Quadro 3), observa-se que a argamassa de referência é considerada não inerte e a argamassa com o resíduo é considerada inerte.

Propriedades mecânicas

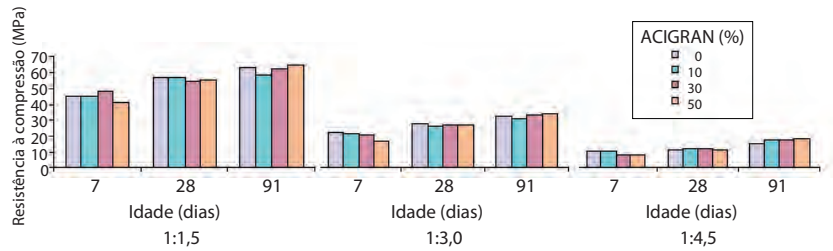


Figura 15. Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas.

Propriedades de Durabilidade

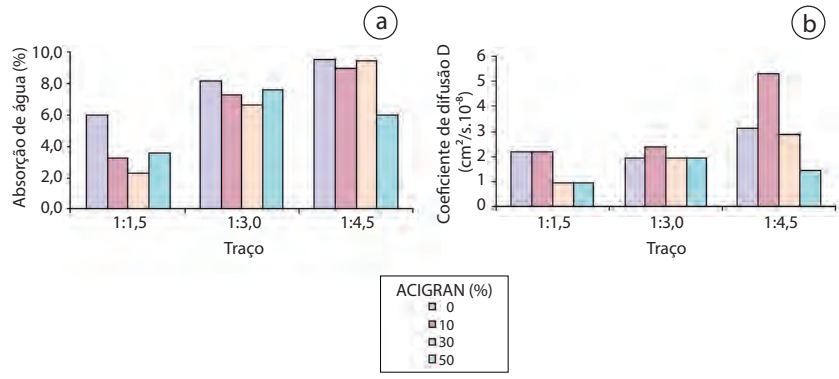


Figura 16. (a) Absorção por imersão, (b) Coeficiente de difusão.

Ponto de vista Ambiental

Quadro 2. Resultados e limites maximos admissiveis do ensaio de lixiviacao das argamassas sem e com escorias

Elementos	LIXIVIAÇÃO		
	Referência (1:1,5) Quantidade	Traço 1:1,5 -50% AciGran Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR 10005
Arsênio	-		5
Bário	< 1	< 1	100,0
Cádmio	0,03	0,02	0,5
Chumbo	0,14	0,1	5
Cromo	0,10	0,18	5
Fluoreto	0,87	1,8	50,0
Mercúrio			0,1
Prata	0,02	0,01	5,0
Selênio			1,0

Quadro 3. Resultados e limites maximos admissiveis do ensio de solubilizacao das argamassas sem e com escorias ACIGRAN

Elementos	SOLUBILIZAÇÃO		
	Referência (1:1,5) Quantidade	Traço 1:1,5 -50% AciGran Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR 10006
Arsênio	-	-	0,05
Aluminio	<0,20	<0,20	0,20
Bário	< 1,00	< 1,00	1,00
Cádmio	-	-	0,005
Chumbo	<0,05	<0,05	0,05
Cianeto	-	-	0,10
Cloreto	1,40	2,10	250,00
Cobre	< 0,02	< 0,02	1,0
Cromo	0,04	0,04	0,05
Dureza	1258	442	500
Fenol	-	-	0,001
Ferro	<0,03	<0,03	0,30
Fluoreto	0,03	0,16	1,50
Manganês	0,03	0,03	0,10
Mercúrio	-	-	0,001
Nitratos	-	-	10,00
Prata	< 0,01	<0,01	-
Selênio	-	-	-
Sódio	57	88	200
Sulfatos	250	109	400
Sulfactantes	-	-	0,20
Zinco	< 0,01	<0,01	5,00

O resíduo apresentou respostas satisfatórias em todos os quesitos analisados, indicando assim que é possível utilizá-lo na confecção de elementos ou componente de base cimentícia.

4. Considerações Finais

Diante da crescente preocupação com questões ambientais e o grande volume de resíduos gerados, o reaproveitamento de produtos, subprodutos e resíduos agrícolas, industriais e da construção civil é fundamental para reduzir os impactos ambientais gerados pela sociedade. Dada como uma das alternativas para este problema, a incorporação destes resíduos pela construção civil, em matrizes cimentícias, pode ser realizada desde que seja feita previamente uma análise da sua interferência nas propriedades mecânicas e na durabilidade das estruturas. Atualmente, o Brasil não conta com uma norma específica que regulamente quanto à utilização de resíduos em matrizes cimentícias. Neste contexto, este trabalho apresentou a sistematização de uma metodologia para verificar o potencial deletério de determinados resíduos quando incorporados em matrizes cimentícias.

A metodologia de avaliação proposta é apresentada com o intuito de auxiliar e padronizar a verificação do potencial deletério oriundo da incorporação de resíduos em argamassas e concretos. Além disto, deve ser encarada como pioneira, servindo de contribuição para estudos mais aprofundados e elaborados sobre o assunto. Salienta-se que a metodologia apresentada não contempla a contaminação do resíduo (que pode ocorrer no estoque e durante o transporte) e considera somente como potencial deletério os principais compostos químicos do resíduo (obtidos a partir de revisão bibliográfica). No entanto, outros elementos químicos com potenciais deletérios, não comuns, podem estar presentes nos resíduos em função da variação na sua composição, que não são considerados neste trabalho.

Vale ressaltar que todas as matrizes cimentícias que empregam resíduos devem atender a Norma de Desempenho (NBR 15.575), levando em consideração a aplicação que se deseja para elas.

Referências Bibliográficas

ABREU, A. G. *Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos Convencionais*. Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.

ABREU, A. G. *Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com altos teores de cinza volante.* 2004. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1260/14: *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method).* Philadelphia, 2014. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1206/10: *Standard test Methos for Plutonium by Iron (II)/ Chromium (VI) Amperometric Titration (Withdrawn 2015).* Philadelphia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-1293/08: Standard test Methos for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.* Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1260/14: *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method).* Philadelphia, 2014. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-227/10a: Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)*. Philadelphia, 2010. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-295/08: Standard for guide of aggregates for concrete*. Philadelphia, 2008. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004:2004.* Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005:2004.* Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006:2004.* Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11582:2012. C*imento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575: 2013.* Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577- 1: 2008* Agregados – Reação Álcali-Agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577- 3: 2008* Agregados – Reação Álcali-Agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577- 4: 2008* agregados – reação álcali-agregado. Parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577- 5*: *2008:* Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5736:1991. Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5751:2012.* Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânicas – Índice de atividade pozolânicas com cal – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: 2014.* Materiais pozolânicos – Determinação de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752:2012.* Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118:2014.* Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 20014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211:2009:* agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7389-1:2009*. Agregados – Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9917:2009*. Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653:2014.* Materiais Pozolânicas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14832:2002*. Cimento Portland e clínquer - Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 14:2012.* Cimento Portland - Análise química – Método de arbitragem para a determinação de dióxido de silício, óxido de férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 16:2012.* Cimento Portland - Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 17:2012.* Cimento Portland - Análise química – Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 9:2003.* Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BARATA, M. S. Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulin. Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.

BREHM, F. A. *Adição de óxido de zinco a pastas de cimento visando à reciclagem de pós de aciaria elétrica na construção civil.* 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BRITISH STANDARD. *BS EN 1744-1:2009* – Tests for chemical properties of aggregates – Part I, 2009.

CASSA, S. B.l. *A influência da adição de cinza de casca de arroz na resistência de concretos a àcidos.* 2000. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

CENTURIONE, S. L. *Influência das Características das Matérias-Primas no Processo de Sinterização do Clínquer Portland*. 154 f. São Paulo, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CHIARO, S. X.; PETRY, N. S.; TIECHER, F.; B.; C.; KIRCHHEIM, A. P. *Avaliação da potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-agregado de agregados oriundos de resíduos de ágata*. In: XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013, Cartagena. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013.

CORDEIRO, L. N. P. *Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC).* 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

CURUTCHET, B. S. S. *Levantamento de resíduos de produção agro-industriais e seu potencial de utilização na indústria da construção.* 1998. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

DE PAULA, M. O.; TINOCO, I. F.F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C.F.; Avaliação da atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, V.17, n.1, p.15-20, jan.-fev., 2009.

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A.; OLIVEIRA, A.P.N. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. Química Nova. v. 29, n. 6, p. 1175-1179, 2006.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO Jr., H. *Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture.* Cement & Concrete Composites, v. 33, p. 490-496, 2011.

GEYER, A. *Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da conza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto*. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

GEYER, R. T. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

GIORDANI, C. Viabilidade técnica do uso de resíduos do beneficiamento de arenito como substituição do agregado miúdo em argamassas. 2014. 126 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GONÇALVES, J. P. *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.* 2000. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Núcleo Orientado para Inovação das Edificações, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONÇALVES, J. P; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, jan.-mar. 2002.

GUMIERI, A. G. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos. Tese (doutorado). 2002. 251f. Núcleo Orientado para Inovação das Edificações, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HOFFMANN, A. T. Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos. Porto Alegre, Dissertação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: Carneiro, A. P., Brum, I. A. S., Cassa, J. C.S. (ORG). Reciclagem de resíduo para a produção de materiais de construção. Projeto resíduo bom. Salvador: Caixa Econômica Federal. 2001.

JOHN, V. M.; ZORDAN, S. E. *Research & development methodology for recycling residues as building materials - a proposal*. Waste Management (Elmsford), Londres, v. 21, p. 213-219, 2001.

KULAKOWSKI, M. P. *Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.* Porto Alegre, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.* 2001. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MANCIO, M. *Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica.* 2001. 0 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

MARINGOLO, V. *Clínquer Co-Processado*: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. 174 f. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARTINEZ, J. D.; VÁSQUEZ, T. G. P.; JUNKES, J. A.; HOTZA, D.; Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. Química Nova, vol. 32, Nº5, p.1110-1114, 2009.

MASUERO, A. B. *Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento*. 2001. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. Revista ambiente construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 57-81, abr./jun. ISSN 1415-8876, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto*: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2014.

MOURA, W. A. *Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto*. 2000. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MOURA.A. W. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 232p.

NEVES, G.; PATRICIO, S. M. R.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M.C.; *Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos*. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis/SC. 1999

OLLIVIER, J.-P.; VICHOT, A. (Ed.) Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o meio ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014

PAULON, V. A. Reação alcali-agregado em concreto. São Paulo, 1981. 114p. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

PETRY, N. S.; Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015. 178p.

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. Revista Matéria, v.11, n 4, pp 554-454, ISSN 1517-7076, 2006.

POLISSENI, A. E. *Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.* 2005. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

POUEY, M. T. F. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou Pozolânico . Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RECENA, F. A. P. *Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante*. Porto Alegre, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

ROCHA, J. C., JOHN, V. M. *Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*. 2003. In: Coletânea Habitare. Disponível em http://www.habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/125.pdf

RODRIGUES, M.S. *Caracterização de cinza residual da queima da casca do arroz para a produção de argamassas.* 2008. 128f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

SENSALE, G. *Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz*. 2000. 288 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

SERSALE, R. et al. Chracterization and potencialuses of steel slag. *Silicates Industriels*, Bruxelles, v.51, p.163-170, 1986.

SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7, 1980. *Proceedings*... Paris, 1980. p.25-30.

SILVEIRA, A. A. *Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado*. Porto Alegre, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

SILVEIRA, A. A. *A Utilização de Adição de Cinza de Arroz com Vistas à Durabilidade de de Concretos: Estudo do Ataque por Sulfatos.* 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

SOUZA, P. S. L. *Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.* 2003. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

TIECHER, F. *Reação álcali: agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.* 2006.180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VARGAS, A. S. Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação. 2002. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

VARGAS, A. S. Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de aglomerantes especiais. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,, 2006.

VIEIRA, F. M. P. *Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.* 2003. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SALVASTANO, H. Jr.; Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos com fibrocimento. I Conferência latino-americana de construção sustentável. X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 18-21, julho 2004. ISBN 85-89478-08-4.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C005

Ensaios Acelerados Empregados na Indução da Corrosão por Cloretos – Análise a Partir de Concretos com a Incorporação de Resíduos de Tijolos Moídos

5

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira
Gibson Rocha Meira
Valdith Lopes Jerônimo

1. Cenário dos Ensaios Acelerados Empregados na Indução da Corrosão por Cloretos no Concreto

Diversas metodologias experimentais têm sido utilizadas para simular, de forma acelerada, a ação dos cloretos sobre o concreto armado. Essas metodologias diferem não só quanto à forma de introdução dos cloretos na matriz estudada, mas também em relação às diferentes técnicas de monitoramento e aos critérios de avaliação do início do processo de corrosão nas armaduras. Aliado a esses aspectos, cada material apresenta respostas diferenciadas em função da composição que apresenta, da idade, do ambiente de exposição, do modo de confecção e de aplicação (TREJO *et al.*, 2009).

Parte desses estudos foi realizada dispondo a armadura em solução alcalina, de modo a simular o meio ao qual a armadura está submetida no concreto. Logo, esse tipo de meio pode ter facilmente o pH e a concentração de cloretos alteradas com precisão, a critério do pesquisador (TREJO *et al.*, 2009). Contudo, o estudo da corrosão por cloretos em soluções tem a limitação de não permitir a avaliação do transporte de cloretos em uma matriz cimentícia e não representar com fidelidade as condições de interação matriz – armadura.

Quando se utiliza pasta de cimento, argamassa ou concreto, a penetração de cloretos em corpos de prova se torna mais demorada e a quantificação da

concentração de cloretos presente na superfície do aço, mais difícil e trabalhosa (ANGST *et al.*, 2009). No entanto, esses estudos tentam acelerar o transporte de cloretos, a fim de se obter resultados mais rápidos em comparação com os métodos de exposição natural, que, embora representem condição semelhante ao caso de estruturas reais, são inviáveis para uso regular, em função do tempo que demandam.

Na literatura, registram-se diversos métodos de ensaio para indução do transporte e da corrosão por cloretos. Todos esses métodos de ensaio acelerado se baseiam em variações dos mecanismos de transporte dos íons cloretos no interior do concreto, com exceção da adição de cloretos à massa de concreto fresco e das soluções simuladoras da fase líquida do concreto (ANGST *et al.*, 2009). As Figuras 1 e 2 mostram as formas como os cloretos têm sido incorporados em ensaios acelerados de corrosão, considerando os cenários internacional e nacional, respectivamente. Nesse levantamento, foram consideradas 39 publicações internacionais e 16 publicações nacionais.

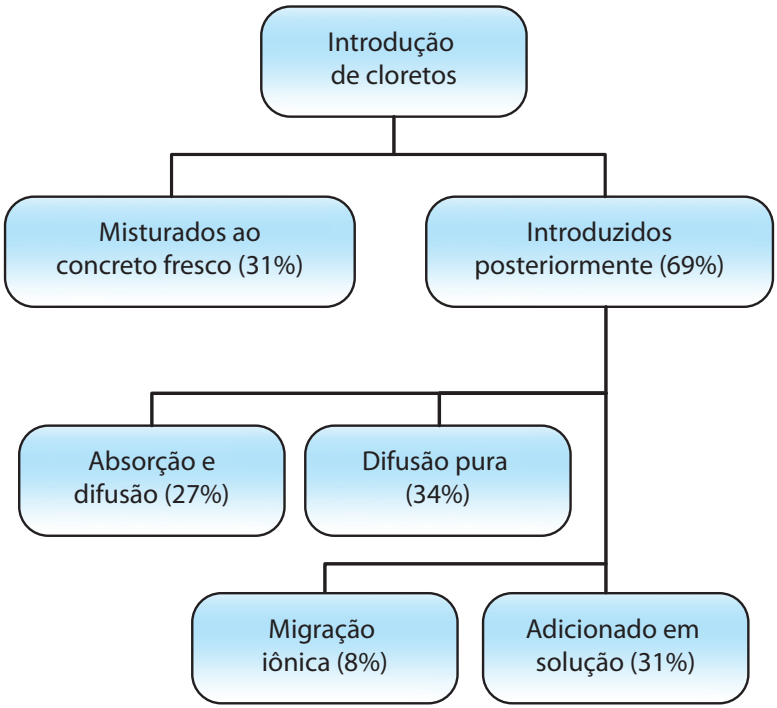


Figura 1. Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário internacional. Fonte: Angst e Vennesland (2009).

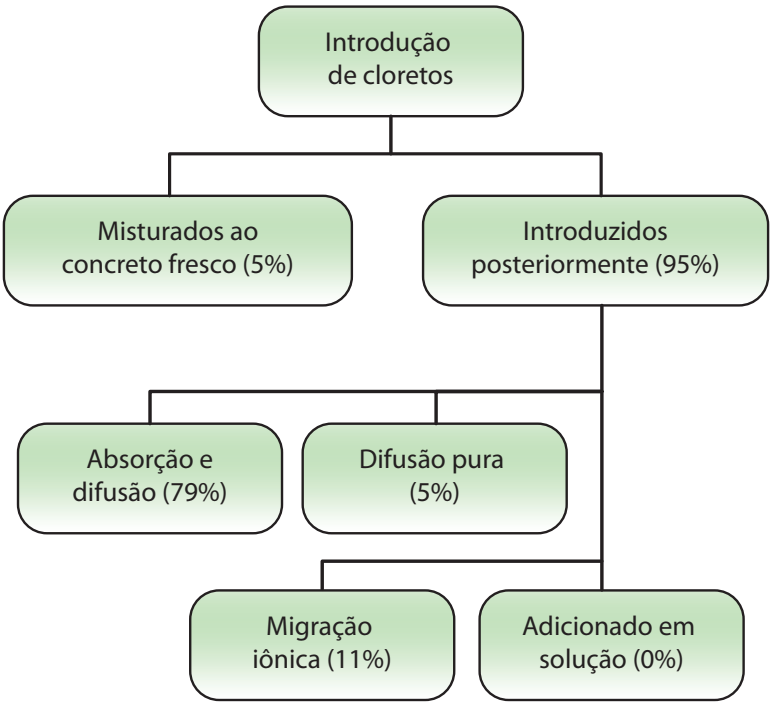


Figura 2. Formas de introdução de cloretos em ensaios acelerados de corrosão – Cenário nacional. Fonte: Ferreira (2015).

Os métodos tradicionalmente empregados pelos pesquisadores envolvem a adição de cloretos à água de amassamento do concreto (ARYA e XU, 1994; GARCIA-ALONSO *et al.*, 2007); a aplicação de um campo elétrico para acelerar a penetração de cloretos no concreto, caracterizando os ensaios baseados na migração iônica (CASTELLOTE *et al.*, 2002; TREJO e PILLAI, 2003), conforme exemplifica a Figura 3; a submissão de concretos a ciclos de secagem e imersão em solução salina, no qual prevalece o mecanismo de transporte por absorção nas camadas mais superficiais e difusão nas camadas internas (MEIRA *et al.*, 2010; SILVA, 2006) e a submissão de concretos à difusão pura através do ensaio de "ponding" (Figura 4) ou à imersão em solução salina (CHIANG e YANG, 2007). No entanto, os resultados obtidos por meio desses métodos carecem de serem confrontados com resultados obtidos a partir de situações reais, de modo a correlacionar os resultados, conforme realizado por Meira *et al.* (2014).

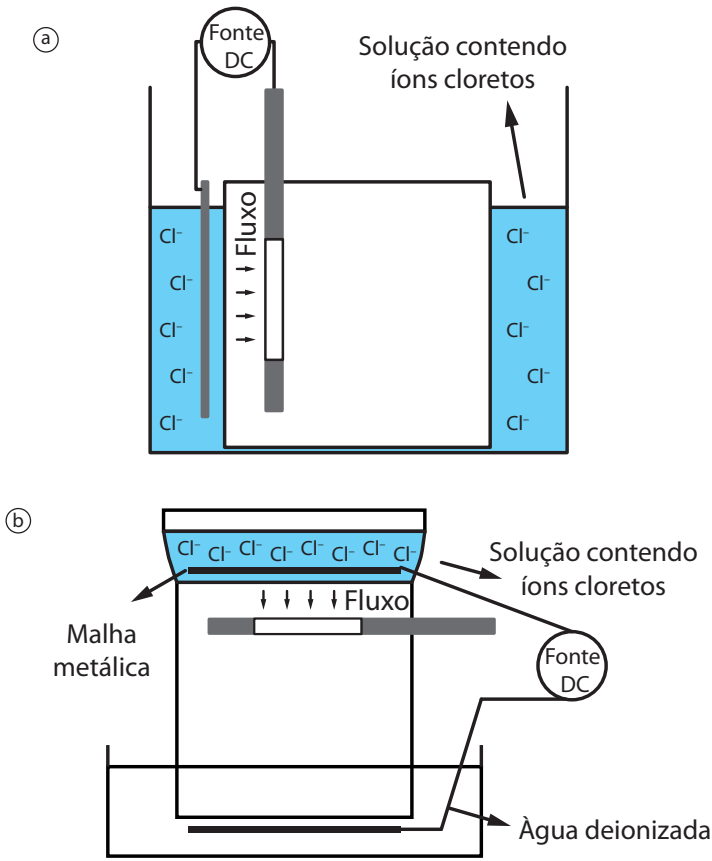


Figura 3. Ensaio de indução da corrosão por migração iônica – configuração com a armadura como um dos pólos conectado (a) e configuração com pólos de conexão independentes da armadura (b). Fontes: Cabrera (1996) e Castellote *et al.* (2002).

No cenário internacional, o método acelerado mais empregado é a adição salina à massa de concreto fresco, seguido por aqueles que empregam difusão pura, como o "*ponding test*". No cenário nacional, o método mais empregado é o de imersão e secagem em solução salina, com participação muito superior aos demais métodos.

A variação nos procedimentos de ensaio apresentados pode influenciar no tempo para despassivação, no mecanismo de transporte, no comportamento eletroquímico da barra e no teor crítico de cloretos. A Tabela 1 faz uma breve análise dos principais métodos acelerados empregados para indução do transporte e corrosão por cloretos em concretos armados.

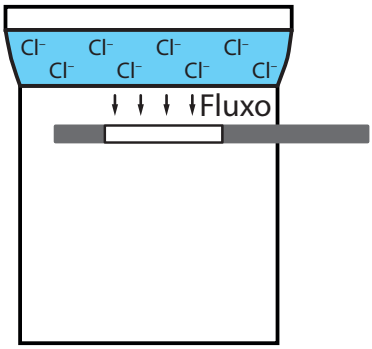


Figura 4. *"ponding test"* ou ensaio com piscina. Fonte: AASHTO T 259 (1980).

Tabela 1. Características dos métodos de ensaio acelerado empregados na indução da corrosão por cloretos.

Características analisadas	**Tipo de ensaio**				
	Adição à massa	**Ciclos de imersão e secagem**	**Migração iônica**	***"ponding test"***	**Simulação em solução**
Tempo de ensaio	○○	-	○	●	○○
Simplicidade de procedimento	●●	●	○○	-	●●
Afinidade com a realidade	○○	●	○	●	○○
Facilidade de leituras de concentração de cloretos	●●	-	-	-	●●
Possibilidade de monitoramento eletroquímico durante o ingresso de cloretos	Não se aplica	●●	○	●●	●●
Alterações no concreto e/ou na interface com a armadura com a aplicação do ensaio	●	○○	●●	○○	●

Legenda: ●● Muito alto ● Alto - Médio ○ Baixo ○○ Muito baixo.

2. Concretos com Uso de Resíduo Cerâmico

A confecção de concretos com o uso de resíduos da construção civil (RCC) vem sendo estudada desde o fim da Segunda Guerra Mundial, considerando a sua viabilidade técnico-econômica de cunho sustentável (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002; BEKTAS, 2014). Esses estudos envolvem a avaliação das propriedades mecânicas do concreto (LEVY, 2001), a viabilidade econômica do seu emprego (VIEIRA e DAL MOLIN, 2004), o processo de hidratação e formação de compostos do cimento com resíduos (TYDLITÁT *et al.*, 2012), o transporte de massa na matriz cimentícia (TOLEDO FILHO *et al.*, 2007) e alguns estudos de durabilidade (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002; VAZQUEZ *et al.*, 2013).

A composição dos resíduos da construção civil pode apresentar significativa variabilidade. Contudo, os resíduos oriundos de materiais cerâmicos representam uma grande fatia da composição do RCC, com quantitativos que assumem valores de 26% em Porto Alegre, 48% em Maceió, 21% em Campinas e 14% em Salvador. Em outros países, essa fatia é de 32% na Holanda e 35% em Taiwan (LEITE, 2001; VIEIRA e DAL MOLIN, 2004).

A inserção desses resíduos no concreto pode se dar por meio da substituição dos agregados ou substituição parcial do cimento. A maior parte dos estudos se concentra na substituição de agregados naturais por agregado reciclado de RCC (VIEIRA e DAL MOLIN, 2004; TYDLITÁT *et al.*, 2012). Estudos focados na avaliação de concretos com substituição de cimento por resíduos cerâmicos ainda são poucos (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012).

Considerando a substituição de agregado graúdo por agregado reciclado de RCC, o trabalho de Levy (2001) mostra que a resistência mecânica do concreto não é afetada até a faixa de 20% de substituição, seguida por quedas drásticas até 100% de substituição. Nesse contexto, Vázquez *et al.* (2013) observaram um sutil aumento na resistência à compressão até a faixa de 20% de substituição, seguida de queda nessa propriedade. Por outro lado, Zong *et al.* (2014) relatam que a resistência mecânica diminui com a substituição de agregado graúdo natural por agregados reciclados de resíduos de tijolos. Esses autores acrescentam que há uma queda da massa específica do material e um aumento na absorção total.

Levando em consideração a substituição do cimento por resíduo de tijolo moído (RTM), Toledo Filho *et al.*, (2007) e Vejmelková *et al.* (2012) observaram que a resistência mecânica do material tende a aumentar até uma

faixa máxima de substituição entre 10% e 20% e, em seguida, a resistência diminui consideravelmente.

Com relação à hidratação de pastas com substituição de cimento por RTM, Tydlitát *et al.* (2012) relatam que o calor de hidratação diminui significativamente com a substituição do cimento por esse tipo de resíduo reciclado, uma vez que o uso desse material retarda a hidratação do C_3S. Esses autores também concluem que as substituições estudadas têm efeito sobre a hidratação do cimento até o limite de substituição de 20% e o percentual excedente atua essencialmente na forma de *filler*.

Considerando o comportamento do coeficiente de difusão em matrizes com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados, Zong *et al.* (2014), estudando concretos com a incorporação de agregados de resíduos cerâmicos, obtiveram um aumento de pouca expressão nesse parâmetro, até a faixa de 30% de substituição, seguido por aumentos significativos até o nível de substituição de 50%. Por outro lado, Vejmelkova *et al.* (2012), estudando concretos com a adição de RTM em substituição ao cimento, apesar de não terem avaliado diretamente o transporte de cloretos, obtiveram um bom desempenho de concretos com níveis de substituição até 20%, quer seja em relação à resistência mecânica, quer seja em relação a ensaios relacionados à durabilidade, como absorção de água.

Sobre a alcalinidade de concretos com a incorporação RTM, percebe-se que há uma redução gradativa no pH da matriz com a adição do resíduo. Vejmelková *et al.* (2012) observaram que os concretos de referência apresentam valores de pH da água de lixiviação da ordem de 12 após 60 dias de imersão em água destilada, enquanto que concretos com substituição de 60% do cimento por RTM apresentaram pH da água de lixiviação da ordem de 11, demonstrando a redução de alcalinidade em função da incorporação do RTM.

Assim como os concretos convencionais, os concretos com a incorporação de resíduos cerâmicos reciclados também estão sujeitos a processos de degradação decorrentes da ação ambiental. A ação dos cloretos representa uma importante fonte de degradação das estruturas de concreto armado devido à corrosão das armaduras. Ensaios que avaliam o transporte de cloretos na matriz cimentícia e a despassivação de armaduras, quer sejam com a aplicação de campo elétrico, quer não, buscam obter parâmetros que quantifiquem esta maior ou menor habilidade de transporte e resistência à corrosão e são amplamente utilizados como instrumentos de comparação entre distintas mesclas de concreto ou na avaliação do período de iniciação da corrosão.

Sabendo que o período de iniciação da corrosão se finaliza com a despassivação da armadura (TUUTTI, 1982), a quantidade de cloretos necessária para desencadear esse processo (teor crítico de cloretos) depende das características da matriz cimentícia, em especial, do pH da solução dos poros do concreto (HAUSMANN, 1967). Nesse sentido, o uso de adições minerais costuma contribuir para uma redução do teor crítico, em função do consumo de hidróxidos nas reações pozolânicas (MEIRA *et al.*, 2014). No entanto, ainda há a carência de estudos sobre o tema para matrizes que empregam materiais reciclados de resíduos cerâmicos.

3. Estudo Experimental de Concretos com RTM com Foco na Corrosão de Armaduras

No presente capítulo, avalia-se o processo de indução da corrosão por cloretos em concretos armados com a incorporação de RTM por meio dos ensaios acelerados de imersão e secagem e migração iônica. Para tanto, consideraram-se dosagens com três teores de RTM e concentrou-se a análise no tempo de ensaio, na resposta em relação ao comportamento eletroquímico das armaduras, bem como no teor crítico de cloretos. Os detalhes dos procedimentos adotados são descritos, de forma simplificada, a seguir.

3.1. Materiais Empregados

O resíduo utilizado nesta pesquisa é originário da indústria de cerâmica vermelha, obtido a partir do descarte de tijolos de uma indústria cerâmica que abastece o mercado da Paraíba. Após a seleção, o material foi moído em moinho de bolas até atingir uma superfície específica próxima a do cimento. A Tabela 2 mostra as características químicas e físicas do RTM, bem como do cimento CPV empregado.

Seguindo as recomendações da NBR 5752 (ABNT, 2012), o índice de atividade pozolânica (IAP) do RTM empregado foi de 86%. Durante todo o andamento de caracterização dos materiais, confecção dos corpos de prova (CPs) e exposição ao ambiente agressivo, o resíduo empregado foi considerado pozolânico[1].

1. Com a atualização da NBR 5752 em 2014, o limite mínimo do IAP passou para 90 %, o que não seria atendido pelo RTM empregado.

Tabela 2. Características químicas e físicas do RTM e do cimento empregados.

Características analisadas		**RTM**	**Limite (NBR 12653/12)**	**Cimento CPV**	**Limite (NBR 5733/91)**
Composição química (%)	Na_2O	0,4	≤1,5	-	
	MgO	1,1	-	0,4	≤ 6,5
	Al_2O_3	16,2	-	2,6	
	SiO_2	51,9	-	10,9	
	P_2O_5	0,2	-	-	
	SO_3	1,2	-	4,1	≤ 3,5
	K_2O	4,8	-	0,6	
	CaO	3,5	-	73,3	
	Fe_2O_3	16,4		5,0	
	SrO	0,1	-	0,1	
	ZrO_2	0,1	-	-	
	TiO_2	2,0	-	0,4	
	V_2O_5	0,2	-	0,1	
	BaO	0,3	-	-	
	MnO	0,1	-	0,1	
Perda ao fogo (%) – NBR 5743/77		1,5	-	2,4	≤ 4,5
Área especifica – Blaine (cm^2/g) – NBR NM 76/98		5.080	-	3.820	≥ 3.000
Massa específica (g/cm^3) – NBR NM 23/01		2,62	-	3,15	-

As dosagens empregadas estão descritas na Tabela 3, assim como as características físicas e mecânicas das dosagens.

Tabela 3. Características físicas das dosagens.

Características Analisadas			**Traços (Cimento: RTM: Areia: Brita: a/ag[2])**		
Traços em massa			1:0:1,86: 2,25:0,55	0,9:0,1:1,86: 2,25:0,55	0,7:0,3:1,86: 2,25:0,55
Abatimento (mm) – NBR NM 67/98			220	210	190
Consumo de aglomerante (kg/m^3)			414,3	414,3	414,3
Consumo de cimento CPV (kg/m^3)			414,3	372,9	290,0
Absorção total - NBR 9778/05	28 dias	M. esp. (g/cm^3)	2,58	2,58	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,10	15,35	15,39
		Absorção (%)	6,87	7,01	7,07
	90 dias	M. esp. (g/cm^3)	2,58	2,59	2,57
		Ind. de vazios (%)	15,05	15,30	15,39
		Absorção (%)	6,87	6,98	7,07
Resistência Mecânica (MPa) – NBR 5738/03	14 dias		41,0	33,1	29,4
	28 dias		47,1	35,9	32,9
	90 dias		52,2	47,2	44,6

Na preparação dos corpos de prova, empregaram-se barras de aço CA 50, as quais foram previamente limpas por meio de decapagem química, segundo procedimento ASTM G1 (2011). Para o emprego dessas barras, delimitou-se uma longitude intermediária de exposição de 3 cm, conforme detalha a Figura 5. A cura úmida realizada foi de 28 dias.

Ao final do período de cura, das seis faces dos corpos de prova, quatro foram pintadas com resina epóxi para garantir um fluxo unidirecional de cloretos. Seis barras (três corpos de prova) foram empregadas para cada condição de ensaio.

2. a/ag = relação água/aglomerante.

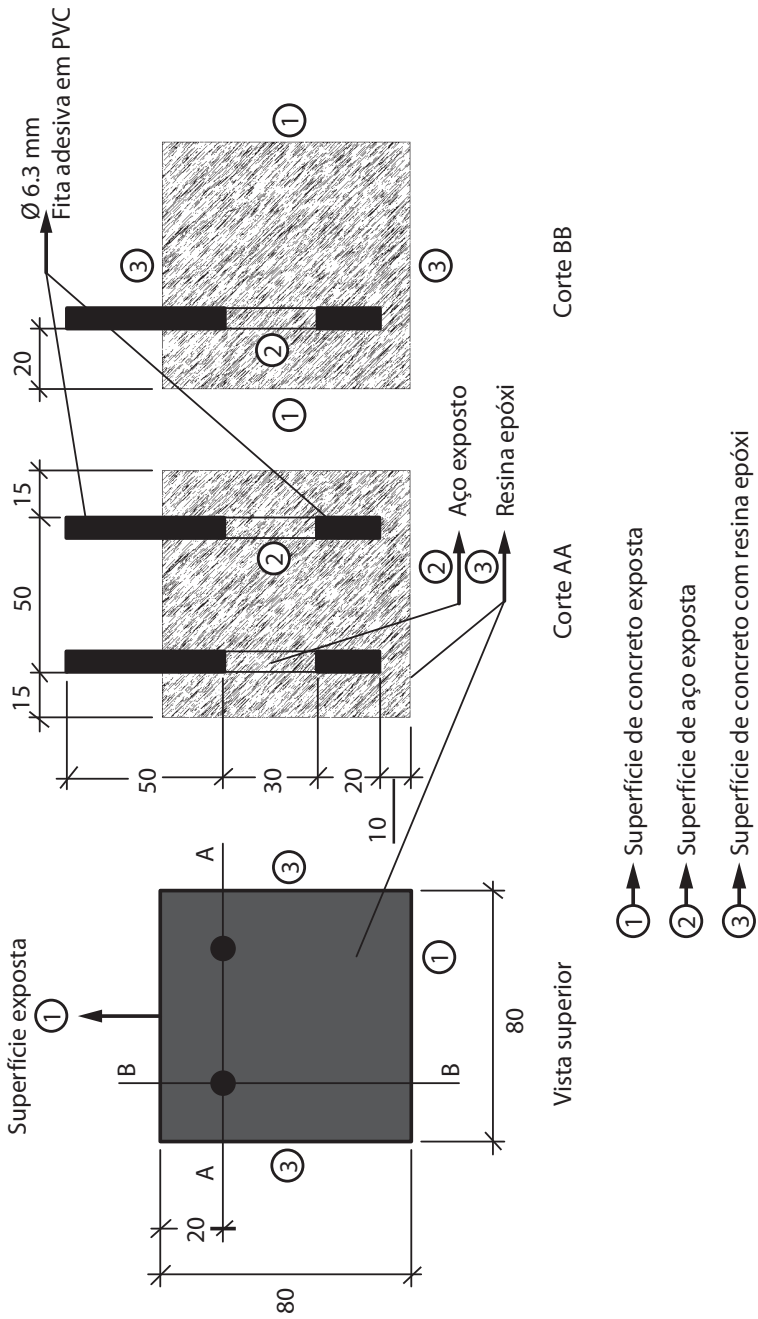


Figura 5. Características geométricas dos corpos de prova (medidas em mm).

3.2. Ensaios Acelerados para Indução da Corrosão

Nos ciclos de imersão e secagem, empregou-se secagem em estufa a 45ºC por quatro dias e imersão em solução de cloreto de sódio 1M por 3 dias, com renovação da solução a cada dois ciclos (Figura 6).

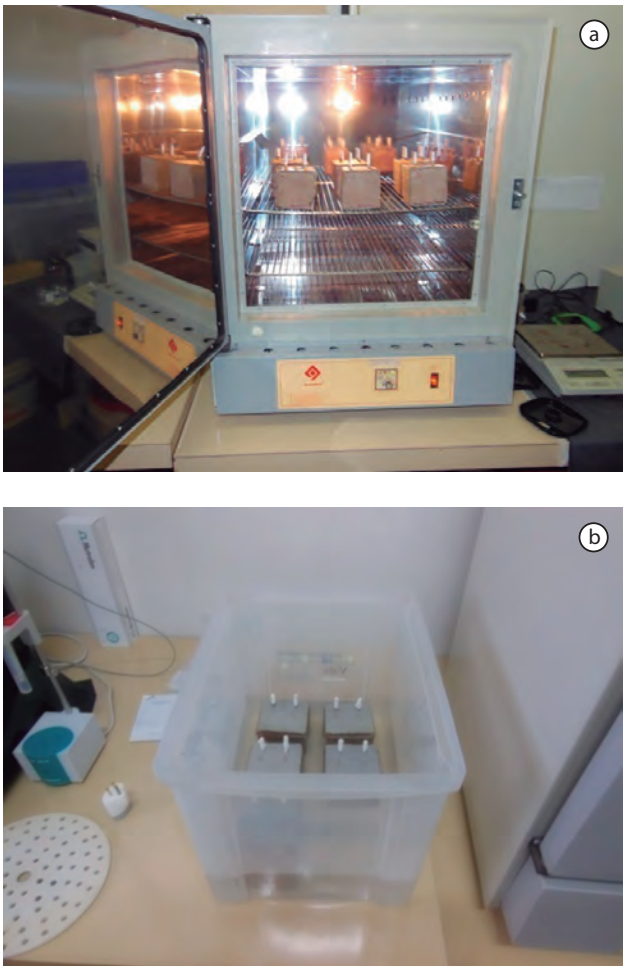


Figura 6. Configuração de ensaio por imersão e secagem – secagem em estufa (a) e imersão em solução salina (b).

Nos ensaios de migração iônica, empregou-se um campo elétrico de 12 V e a mesma solução salina de cloreto de sódio 1M (Figura 7). Os corpos de prova foram previamente saturados em água deionizada e o campo elétrico foi aplicado em intervalos que compreendiam cinco horas em funcionamento

e dezenove horas em repouso, para minimizar o efeito de polarização da armadura nas medidas eletroquímicas realizadas em seguida.

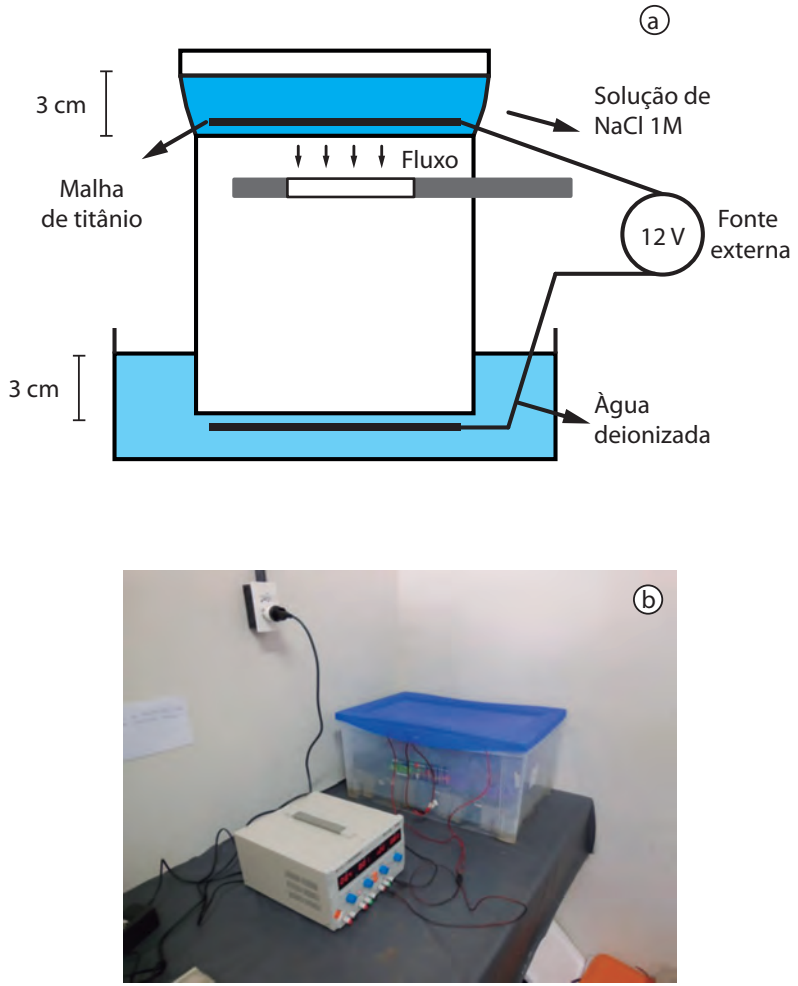


Figura 7. Configuração do ensaio de migração iônica – desenho esquemático (a), realização do ensaio (b).

3.3. Avaliação da Alcalinidade da Matriz Cimentícia

A avaliação da alcalinidade das matrizes estudadas se baseou no método proposto por Oliveira e Agopyan (2000), o qual consiste na lixiviação de

compostos alcalinos da matriz cimentícia quando posta em contato com água deiozidada durante certo período de tempo.

No presente caso, foram confeccionadas pastas de cimento com a adição, em massa, de RTM nas proporções de 0, 10, 20 e 30%. Após um período de cura semelhante ao empregado nos corpos de prova, esse material foi triturado e colocado em contato com água deionizada por um período de 90 dias, em ambiente inerte. Durante esse período, medidas de pH dessa água de lixiviação foram realizadas nas idades de 0, 7, 28 e 90 dias.

3.4. Monitoramento Eletroquímico

O monitoramento eletroquímico, realizado em ambos os ensaios, baseou-se em medidas de potencial de corrosão em circuito aberto e na técnica eletroquímica de resistência à polarização com compensação da queda ôhmica, para obtenção da densidade de corrente instantânea de corrosão.

O equipamento empregado nas leituras foi um ponteciostato de bancada, com um eletrodo de referência de Cu|$CuSO_4$ (ESC) e um contra-eletrodo de aço inoxidável, mantendo-se todo o conjunto envolto por uma gaiola de Faraday para evitar interferências externas (Figura 8).



Figura 8. Arranjo para as medidas de resistência de polarização – vista geral (a) e detalhe (b).

O critério adotado para a identificação da despassivação da armadura foi o seguinte: duas medidas consecutivas com potencial de corrosão mais eletronegativo que -350 mV (ESC) e densidade de corrente de corrosão

superior a 0,1 μA/cm², seguindo recomendações da ASTM C876 (2009) e de Cigna *et al.* (1997).

4. Resultados e Análises

4.1. Alcalinidade das Matrizes

A alcalinidade da matriz cimentícia está diretamente ligada à formação e estabilidade da película passivadora no interior do concreto. Na fase líquida, tal alcalinidade é garantida pela presença dos hidróxidos de sódio (NaOH), de potássio (KOH) e, de forma complementar, da portlandita (hidróxido de cálcio) (ANDRADE e PAGE, 1986). Os concretos estudados apresentaram uma redução de alcalinidade com o incremento do teor de RTM (Figura 9), explicado pelas reações pozolânicas que consomem parte dos hidróxidos da matriz cimentícia, em especial o hidróxido de cálcio.

A Figura 9 apresenta resultados até 90 dias e mostra que as diferenças de pH da água de lixiviação, em comparação com a mistura de referência, podem alcançar o patamar de 0,6 para 30% de RTM, o que significa uma variação na concentração de OH^- de mais de 3,5 vezes.

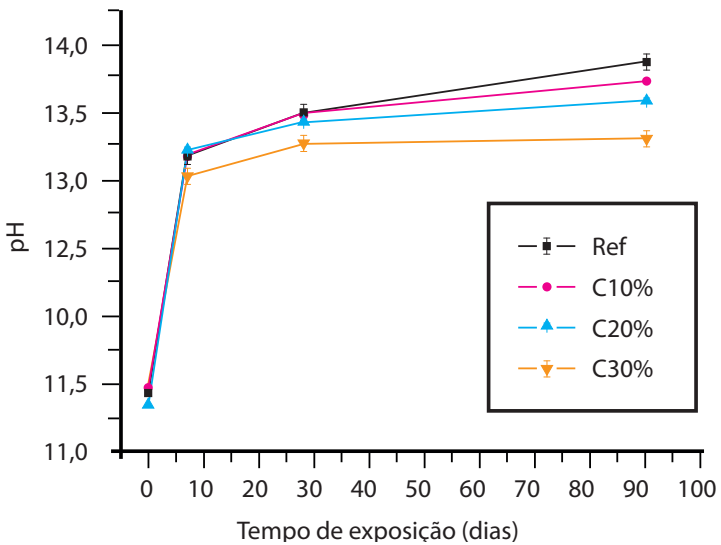


Figura 9. pH da água de lixiviação com o tempo de exposição.

4.2. Período de Iniciação da Corrosão

Como era de se esperar, os ensaios de migração iônica, por contarem com a aplicação de um campo elétrico, apresentaram menor período de iniciação da corrosão. Por outro lado, a incorporação de RTM também reduziu o período de iniciação da corrosão. As Figuras 10 e 11 mostram o comportamento eletroquímico dos materiais estudados e, por meio das medidas de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão, mostram essa influência.

As faixas indicadas nos gráficos de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão se baseiam nos referenciais sugeridos pela ASTM C876 (2009) e Cigna *et al.* (1997), quando se referem à probabilidade de corrosão e ao risco de corrosão, respectivamente.

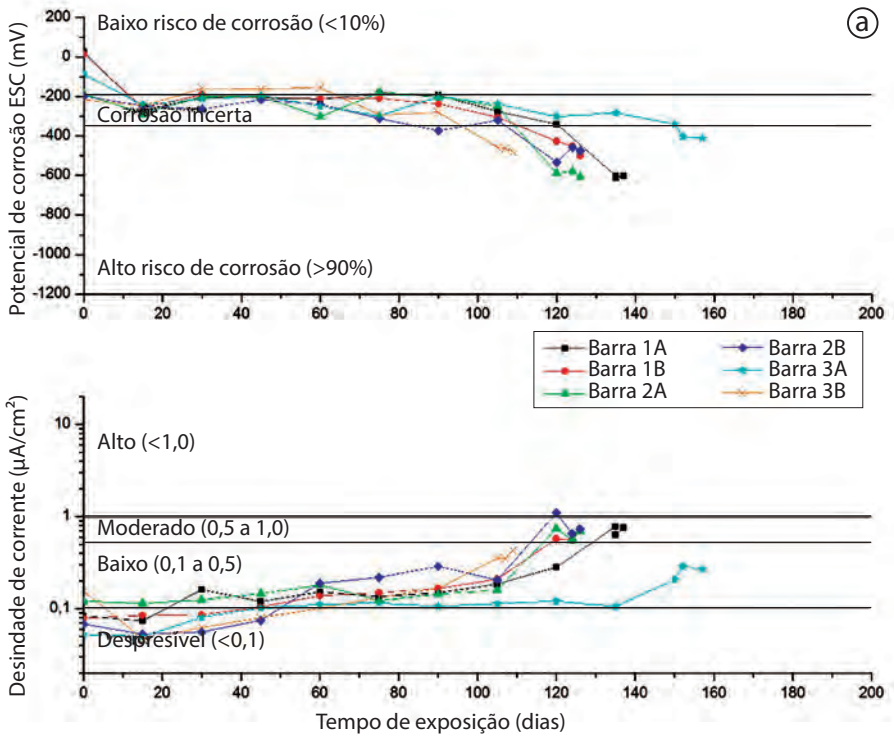


Figura 10. Evolução temporal do potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão nos ensaios de imersão e secagem – Traço de referência (a), Traço com 10% de RTM (b), Traço com 30% de RTM (c).

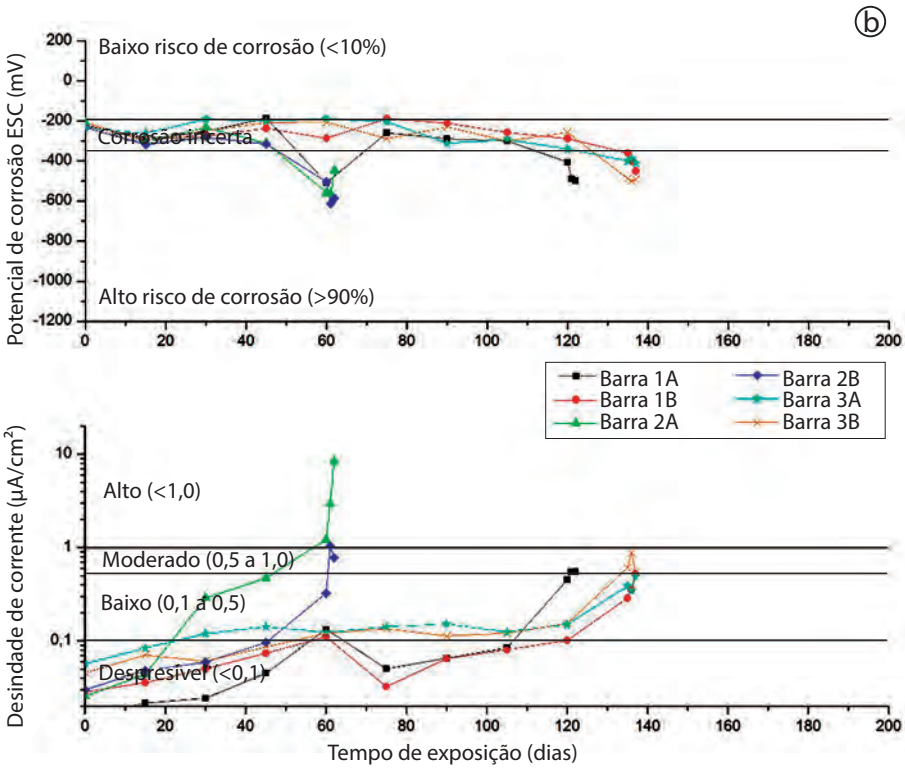


Figura 10. Continuação.

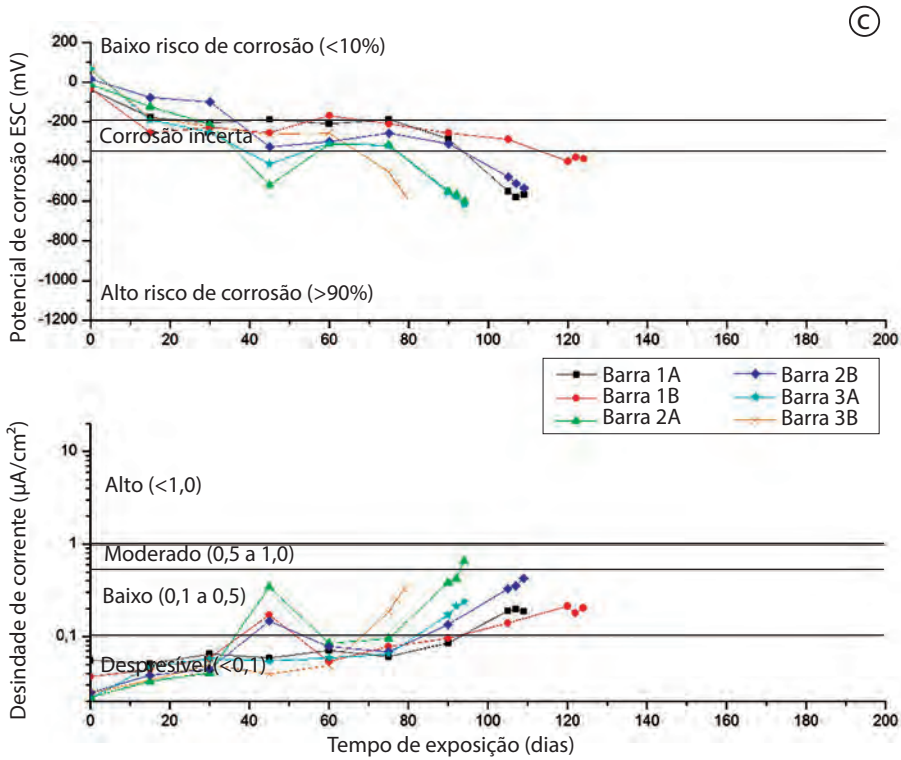


Figura 10. Continuação.

Tendo como referência a Figura 10, observa-se que o tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de 98 ± 16 dias para concretos com 30% de RTM, 108 ± 38 dias para concretos com 10% de RTM e 128 ± 16 dias para o concreto de referência.

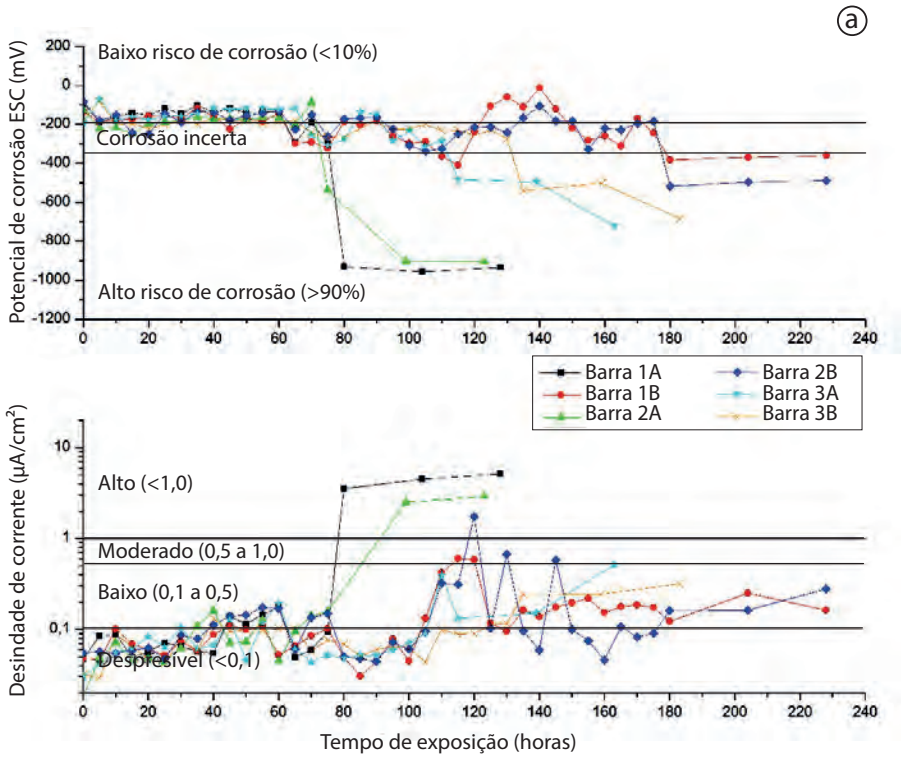


Figura 11. Evolução temporal do potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão nos ensaios de eletromigração – Traço de referência (a), Traço com 10% de RTM (b), Traço com 30%de RTM (c).

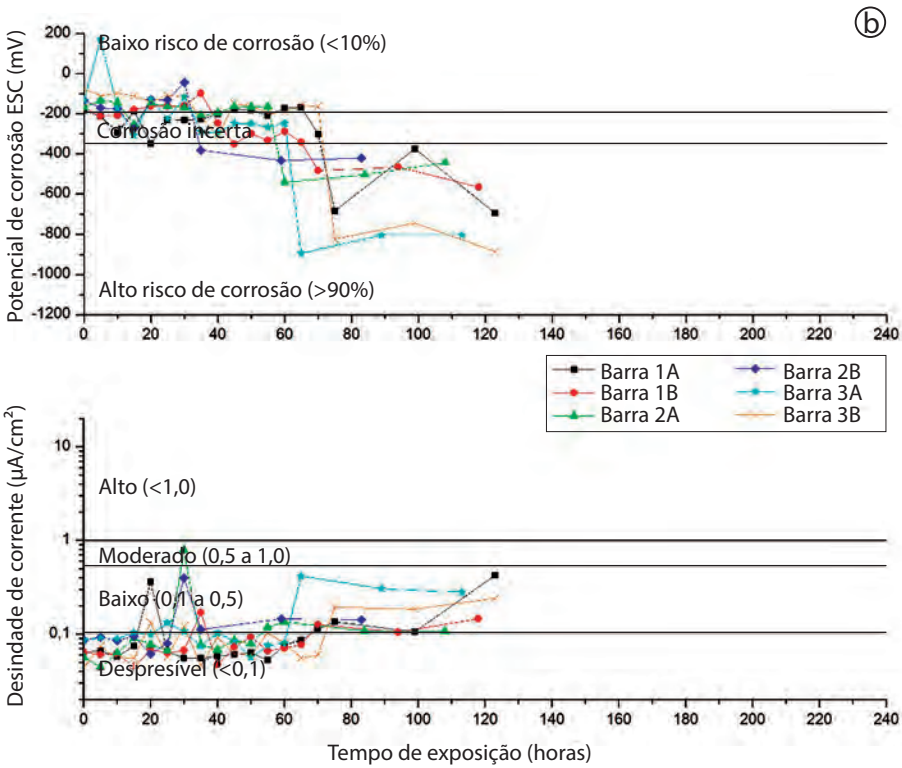


Figura 11. Continuação.

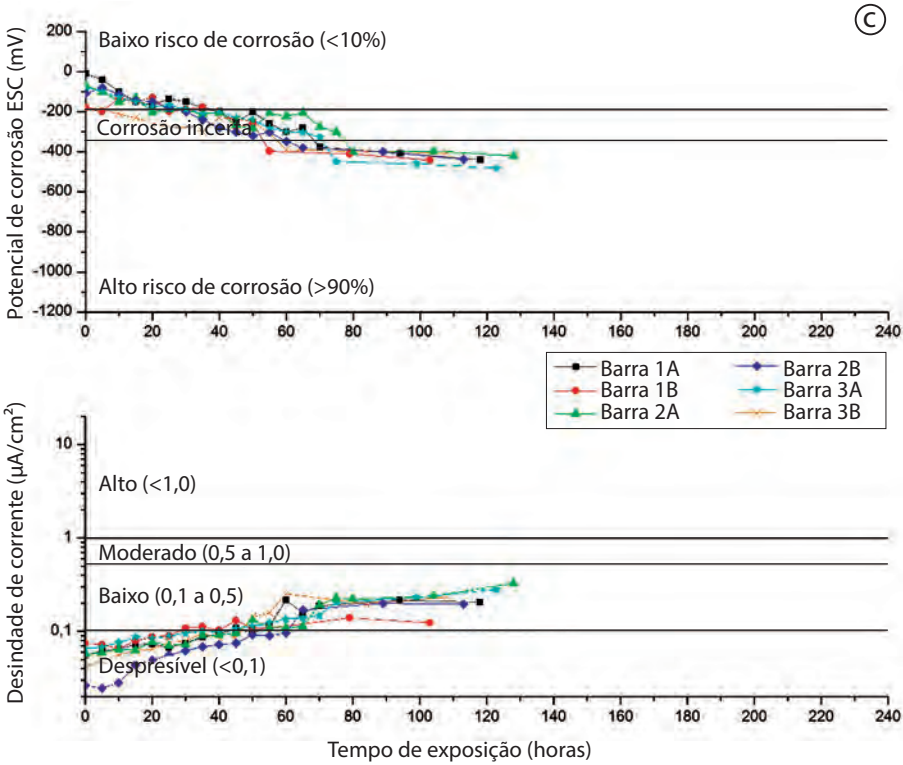


Figura 11. Continuação.

Tendo como referência a Figura 11, observa-se que o tempo médio de despassivação e o seu desvio padrão foram de 63,33 ± 15,1 horas para concretos com 10% de RTM, de 67,5 ± 9,4 horas para concretos com 30% de RTM e de 127,5 ± 46,3 horas para o concreto de referência.

De modo geral, percebe-se que a substituição de cimento por RTM reduz o tempo de exposição dos espécimes até a detecção do início do processo corrosivo, o que pode ser explicado pela redução de alcalinidade das matrizes com RTM, com impacto sobre o teor crítico de cloretos. O leve aumento da porosidade nas misturas com RTM, com possível impacto sobre a velocidade de transporte de cloretos, não se confirmou por meio dos perfis de cloretos (FERREIRA, 2015).

4.3. Teor Crítico de Cloretos

Os resultados de teores críticos de cloretos foram obtidos a partir de ajustes da Segunda Lei de Fick aos perfis de cloretos reescalonados, segundo procedimento descrito por Andrade e Alonso (1997), logo após a identificação da despassivação da armadura. Considerou-se o teor crítico o valor de concentração em que a curva ajustada toca a superfície da barra (Figura 12). Considerando o reescalonamento dos perfis, a profundidade do pite é a menor distância entre a superfície do concreto e o pite formado, e o período de iniciação da corrosão corresponde ao tempo de exposição ao ambiente deletério até a detecção da despassivação. Esse procedimento foi empregado tanto para os teores de cloretos totais como para os teores de cloretos livres. Após a obtenção dos valores de teores críticos, adicionalmente, foi empregada a técnica estatística de Chauvenet para análise dos dados espúrios, o que permitiu o emprego de dados mais consistentes e representativos da amostra.

A Figura 13 mostra os resultados médios e desvios padrões dos teores críticos para cloretos livres e totais. Observa-se um decréscimo no teor crítico com a incorporação de RTM, para todas as combinações propostas. Esse comportamento é explicado pela redução na alcalinidade do concreto com a substituição de cimento por RTM e este é motivado pela redução no consumo de cimento em cada traço (Tabela 2) e pelas reações pozolânicas entre o cimento e o RTM (MEIRA *et al.*, 2014; FERREIRA, 2015). Menor alcalinidade da matriz significa uma formação menos eficiente da película de passivação e menor tolerância à presença de cloretos, representada pela relação $[Cl^-]/[OH^-]$, conforme observado por Hausmann (1967).

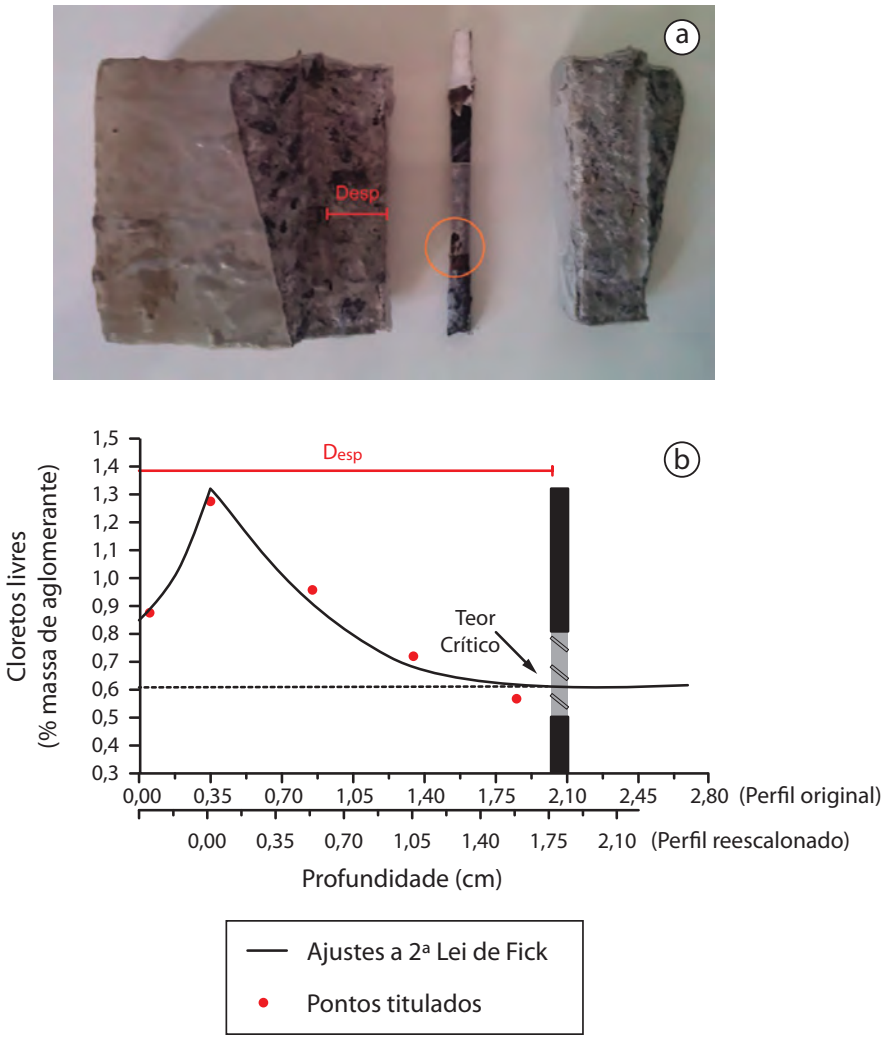


Figura 12. Detecção do pite de corrosão (a) e identificação do teor crítico de cloretos (b).

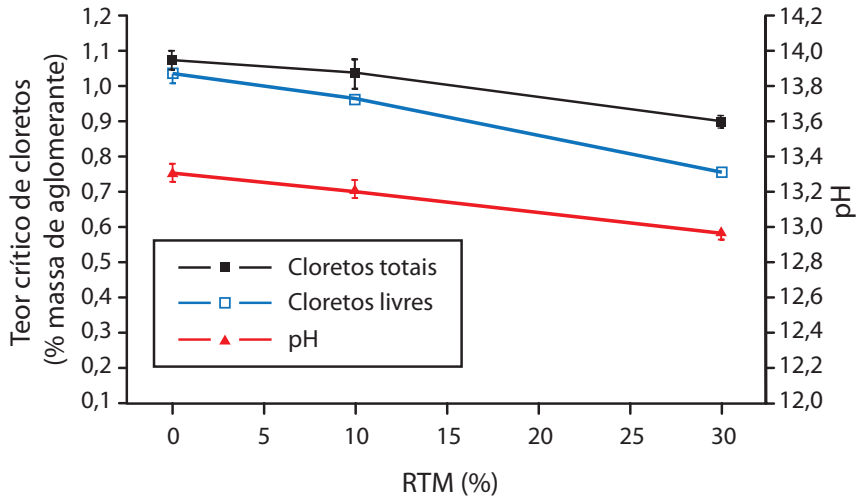


Figura 13. Teor crítico de cloretos livres e totais em função do percentual de RTM – imersão e secagem.

Considerando os ensaios de migração iônica, observa-se, por meio da Figura 14, que, para esse ensaio, a substituição de cimento por RTM também reduz progressivamente os teores críticos de cloretos livres e totais, conforme observado nos ensaios de imersão e secagem.

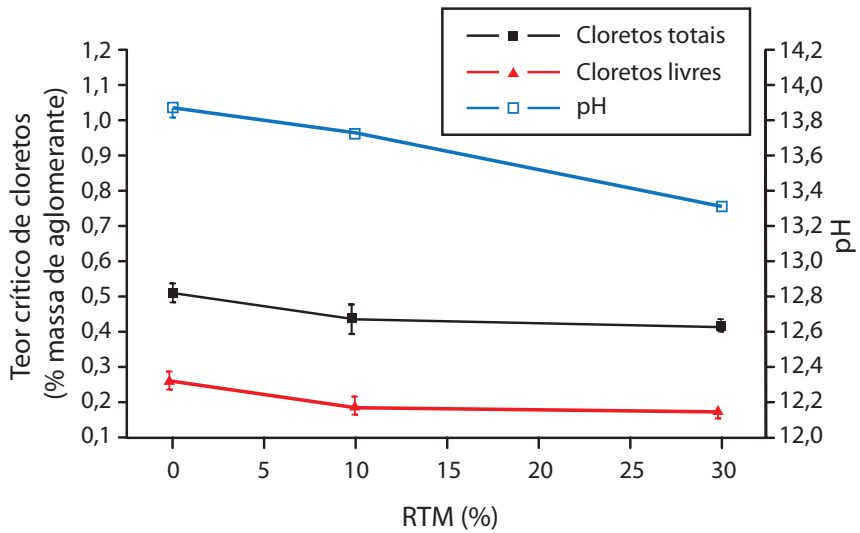


Figura 14. Teor crítico de cloretos livres e totais em função do percentual de RTM – migração iônica.

4.4. Comparação Entre os Métodos Acelerados de Indução da Corrosão

4.4.1. Período de Iniciação da Corrosão e Monitoramento Eletroquímico

Os tempos para despassivação da armadura foram bastante diferenciados. Concretos armados submetidos ao ensaio de imersão e secagem demoraram cerca de até 150 dias para atingir a ativação da armadura, enquanto os concretos submetidos ao ensaio de migração permaneceram em ensaio por, no máximo, 180 horas, o que representa uma diferença significativa. Segundo Angst *et al.* (2009), a maior vantagem do ensaio de migração é a rapidez. Contudo, existem algumas inconveniências, como se comenta a seguir.

A aplicação do campo elétrico através do concreto armado gera polarização na armadura, esse fenômeno interfere nas leituras de potencial de corrosão e densidade de corrente. No entanto, tal efeito é reversível (AUSTIN *et al.*, 2009; CASTELLOTE *et al.*, 2002). Um tempo mínimo de despolarização de 48 horas foi requerido para que as medidas de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão se apresentassem com menor influência desse efeito.

4.4.2. Teor Crítico de Cloretos

A partir da análise dos resultados de teor crítico de cloretos livres e totais, percebe-se a influência da variável dosagem, tanto para os ensaios de imersão e secagem, quanto para os ensaios de migração. Observa-se que quanto menor a substituição de cimento por resíduo de tijolo moído, maiores são os valores de teor crítico de cloretos livres e totais em ambos os ensaios.

Em comparação com os resultados apresentados na literatura, observa-se que os valores de teor crítico de cloretos estão em consonância com outros estudos, considerando ensaios acelerados semelhantes. No entanto, comparando os resultados deste trabalho com os valores obtidos de espécimes submetidos à exposição natural, percebe-se um aumento nos teores críticos de cloretos para corpos de prova submetidos a ciclos de imersão e uma redução de valores para corpos de prova submetidos ao ensaio de migração iônica.

O incremento nos valores do teor crítico de cloretos livres e totais dos espécimes submetidos ao ensaio de imersão e secagem se explica em função de alguns aspectos: um aumento no grau de hidratação desses corpos de prova em função dos semi ciclos de imersão e um consequente refino da porosidade do material, com impacto no comportamento da película de passivação (MEIRA *et al.*, 2014); uma menor disponibilidade de oxigênio em camadas próximas da armadura, em virtude dos espécimes estarem com os poros saturados em boa parte do tempo (ANGST *et al.*, 2009) e aos curtos ciclos de passivação e repassivação até a consolidação do início do processo corrosivo, colaborando para a penetração de mais cloretos (MEIRA *et al.*, 2014).

A redução dos teores críticos de cloretos para os ensaios de migração iônica, em comparação aos obtidos em exposição natural, pode ser explicado por alterações de equilíbrio químico, devido à ação do campo elétrico (CASTELLOTE *et al.*, 2002; ANGST *et al.*, 2009; TREJO et. al., 2009). No entanto, essas diferenças não se apresentaram de forma acentuada, como pode ser observado no trabalho de Meira (2004) e na Tabela 4.

Tabela 4. Limites mínimos e máximos para teores críticos de cloretos livres e totais, com nível de confiança de 99%.

Tipo de ensaio	Tipo de concreto	Cloretos livres (% massa de aglomerante)		Cloretos totais (% massa de aglomerante)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Imersão e secagem	Referência	0,7203	0,7819	1,0418	1,1018
	10 % de RTM	0,6732	0,7354	0,9877	1,0848
	30 % de RTM	0,5584	0,6106	0,8768	0,9182
Migração iônica	Referência	0,2399	0,2821	0,4889	0,5311
	10 % de RTM	0,1785	0,1995	0,4295	0,4505
	30 % de RTM	0,1605	0,1815	0,3939	0,4361

5. Considerações Finais

Os ensaios com a aplicação de campo elétrico têm a vantagem de encurtar o período de ensaio. Contudo, a perturbação provocada pela presença do campo elétrico traz inconvenientes em relação ao monitoramento eletroquímico, bem como em relação ao teor crítico de cloretos. Isso faz com que o mesmo deva ser

aplicado com cuidado, quando o objetivo passar por uma análise quantitativa. Nesse contexto, os concretos submetidos ao ensaio de imersão e secagem, apesar de demandarem mais tempo de ensaio, têm a vantagem de envolverem mecanismos de transporte semelhantes aos observados em situações reais. Em ambos os casos, deve-se pensar em calibrar os resultados de teor crítico de cloretos com resultados de exposição natural, de forma semelhante ao que propõe Meira *et al.* (2014).

Considerando o impacto da substituição do cimento por RTM no teor crítico de cloretos, há uma tendência de redução dos teores críticos com o aumento do nível de substituição, o que se observa de forma mais pronunciada nos ensaios de migração iônica.

Partindo do pressuposto que ensaios de imersão e secagem têm mais afinidade com a realidade, já que envolvem mecanismos de transporte semelhantes ao caso de exposição natural, conclui-se que a substituição de cimento por RTM é tecnicamente viável, em ambientes favoráveis à corrosão por cloretos, até um nível de substituição de 10%, havendo uma forte tendência de melhorar o seu desempenho com o tempo, dado o avanço das reações pozolânicas.

Referências Bibliográficas

AMERICAN ASSSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSORTATION OFFICIALS. *AASHTO T 259*: Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, 1980.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-876*. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Anual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM G1*. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens. Anual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2011.

ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of skin effects on diffusion process in concrete. In: Nilsson, L. O.; Ollivier, J. P., editors. International RILEM workshop on chloride penetration into concrete, 1995, Paris. *Proceedings*…, Paris: RILEM; 1997. p.182-194.

ANDRADE, C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. *British Corrosion Journal*. v. 21, p. 49-53, 1986.

ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - State of the art. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. Taylor & Francis Group, London, p. 311-317, 2009.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cement and Concrete Research*. v. 39, n. 12, p. 1122-1138, 2009.

ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 25, n. 4, p. 893-902, nov. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5743*: Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733*: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 67*: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 76*: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738*: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752*: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653*: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

AUSTIN, S. A.; LYONS, R.; ING, M. Electrochemical behaviour of steel reinforced concrete during accelerated corrosion testing. *Corrosion*. v. 60, n. 2, p. 203-212, 2009.

BEKTAS, F. Alkali reactivity of crushed clay brick aggregate. *Construction and Building Materials*. v. 52, p. 79-85, 2014.

CABRERA, J. G. Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion. *Cement and Concrete Composites*. v. 18, p. 47-59, 1996.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosion Science*. v. 44, p. 2409-2424, feb. 2002.

CHIANG, C. T.; YANG, C. C. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. *Materials Chemistry and Physics*. v. 106 p. 240-246, 2007.

CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NÜRNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. *Corrosion and protection of metals in contact with concrete*. COST Action 509 – Final Report. European Community: Luxembourg, 1997.

FERREIRA, P. R. R. *Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados*. 2015. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências. Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

GARCIA-ALONSO, M. C.; SALTA, M. *et al.* Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 37, p. 1463-1471, june 2007.

HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in concrete: how does it occur? *Materials Protection*, p. 19-23, 1967.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M.; *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. 2001. p.199 tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MEIRA, G. R. *Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado*. 2004, 369 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., J. C. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. *Cement and Concrete Composites*. v. 27, p. 667-676, 2010.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; VILAR, E. O.; NERY, K. D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. *Construction and Building Materials*. v. 55, p. 289-298, 2014.

OLIVEIRA, C. T. A; AGOPYAN, V. *Estudo da água do poro de pasta de cimento de escoria pelo método de água de equilíbrio*. Boletim técnico da Escola politécnica da USP. BT/PCC/259. São Paulo, 2000.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*. v. 32, p. 179-185, 2002.

SILVA, F. G. *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M .R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*. v. 39, p. 1357-1365, 2007.

TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: Part I - ASTM A 615 and A 706 Reinforcement. *ACI Materials Journal*, v. 100, n. 6, p. 519-527. dec. 2003.

TREJO, D.; HALMEN, C.; REINSCHMIDT, K. *Corrosion performance tests for reinforcing steel in concrete*: technical report. SL 0-4825-1. Texas Transportation Institute, Inc. p. 7-33, 2009.

TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Sweden: CBI, 1982. 468 p.

TYDLITAT, V.; ZAKOUTSKY, J.; VOLFOVA, P.; CERNY, R. Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics. *Thermochimica Acta*. v. 543, p. 125-129, 2012.

VÁZQUEZ, E; BARRA, M.; APONTE, D.; JIMÉNEZ, C.; VALLS, S. Improvement of durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Constrution and Building Materials*, nov. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028>. Acesso em: 13 mar. 2014.

VEJMELKOVA, E.; KEPPERT,M.; ROVNANIKOVA, P.; ONDRACEK,M.; KERŠNER, Z.; CERNY, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. v. 34, p. 55-61, 2012.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. *Ambiente Construído*. v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANGA, S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. *Journal of Cleaner Production*. feb.2014.Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.040>. Acesso em: 23 mar. 2014.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C006

Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaios Acelerados com Ciclos Térmicos

6

Claudio de Souza Kazmierczak
Marlova Piva Kulakowski
Feliciane Andrade Brehm
Jeferson Alcantara Alves Sentena
Leandro Marquetto

1. Introdução

Tradicionalmente, na especificação de sistemas construtivos para a construção civil são adotadas soluções cujo desempenho já é conhecido. Entretanto, este procedimento vem sendo substituído por especificações baseadas no desempenho requerido para um determinado sistema. A principal motivação para essa mudança conceitual decorreu da necessidade de se viabilizar a comercialização de novos produtos e sistemas, uma vez que o uso de normas e regulamentações prescritivas geram uma barreira para o aparecimento de inovações. Segundo o *CIB Report 64 – Working with the performance approach in building* (1980), "a abordagem de desempenho é, em essência, a prática de pensar e trabalhar em termos de fins e não de meios". Essa abordagem considera prioritariamente os requisitos que uma construção deve atender, e não a especificação sobre como ela deve ser construída.

Segundo levantamento histórico realizado por Foliente (2000), o primeiro relato sobre especificações baseados no desempenho, realizado nos tempos modernos, data de 1925, quando o *U.S. National Bureau of Standards* publicou a "*Recommended Practice for Arrangement of Building Codes*", na qual se sugere que normas de desempenho sejam adotadas. Apesar dessa

recomendação, apenas no fim dos anos 60 o *U.S. Department of Housing and Urban Development* publicou um documento com critérios para projeto e avaliação de sistemas construtivos inovadores. Nas décadas seguintes, órgãos como o *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB), a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a *The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures* (RILEM) promoveram uma série de conferências sobre o tema. Em 1984, foi publicada a ISO 6241 - *Performance standards in building - Principies for their preparation and factors to be considered,* que lançou a base para as normas de desempenho sobre habitações vigentes atualmente.

Baseada nos princípios da norma ISO 6241, foi lançada, no Brasil, em 2008, a NBR 15.575, que foi revisada em 2011 e intitula-se "Edificações habitacionais – Desempenho". A norma é dividida em 6 partes (Parte 1 – Requisitos gerais, Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais, Parte 3 – Requisitos para os sistemas de pisos, Parte 4 – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas, Parte 5 – Requisitos para os sistemas de coberturas e Parte 6 – Requisitos para os sistemas hidrossanitários). Na Parte 4 se enquadram as alvenarias com revestimento de argamassa. Dessa seção, ressaltamos os requisitos listados na Tabela 1, que são aplicáveis a alvenarias.

A abordagem de desempenho pressupõe a definição dos requisitos e das condições de exposição a que o sistema em avaliação estará submetido, para posterior especificação dos critérios e respectivos ensaios de avaliação do sistema. Deste modo, é fundamental que seja realizada uma análise das condições de exposição dos sistemas de revestimento.

Os revestimentos de argamassa estão sujeitos a uma série de solicitações que influenciam na sua durabilidade, tais como a ação do vento durante a cura da argamassa ou ao longo de sua vida útil, vibrações, ciclos de molhagem e secagem, ciclos de aquecimento e resfriamento, deformações provenientes de sobrecargas, etc. A Figura 1 (adaptada de BONIN et al.,1999) sumariza as solicitações que podem ocorrer em revestimentos de argamassa.

Tabela 1. Requisitos da NBR 15.575-4 diretamente relacionados com alvenarias revestidas com argamassa.

Categoria	**Requisitos**
6. Funcionalidade	Interação com portas dos sistemas de vedações verticais externas e internas.
7. Requisitos de Segurança Estrutural	Estabilidade e resistência estrutural dos sistemas de vedação interno e externo. Deslocamentos, fissuração e descolamentos nos sistemas de vedação interno e externo. Solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas. Impactos nos sistemas de vedação internos e externos. Ações transmitidas por impactos.
10. Estanqueidade	Infiltração de água dos sistemas de vedações verticais externas (fachadas). Umidade nas vedações verticais externas e internas decorrente da ocupação do imóvel.
11. Desempenho Térmico	Adequação de paredes externas. Aberturas para ventilação. Sombreamento das aberturas localizadas nos dormitórios em paredes externas.
12. Desempenho acústico	Níveis de ruído admitidos na habitação.
14. Durabilidade e manutenibilidade	Vida útil de projeto dos sistemas de vedações verticais externas e internas. Manutenibilidade dos sistemas de vedações verticais internas e externas.



Figura 1. Solicitações nos revestimentos (adaptada de BONIN et al.,1999).

Os processos de deterioração de revestimentos de argamassa podem ser organizados em três grupos: físico-mecânicos, químicos e biológicos. Os processos físico-mecânicos são ações que usualmente ocorrem sem a interferência humana e podem ter origem no meio ambiente ou no próprio uso da edificação, como a ação do vento e da chuva sobre os revestimentos, a ascensão capilar e a condensação de água, as vibrações provenientes do meio externo ou inerentes à edificação, os gradientes térmicos e a ação de raios UV, as cargas estáticas e dinâmicas. Os processos químicos estão relacionados às reações químicas dos constituintes dos revestimentos de argamassa ou às reações de substâncias presentes no ambiente local com os materiais de construção. Os processos biológicos são decorrentes da proliferação de micro-organismos nos revestimentos.

Outros fatores também influenciam a durabilidade dos revestimentos, como as características intrínsecas das argamassas, isto é, as propriedades

dos materiais constituintes, a composição da argamassa, as características do processo de mistura e a forma e condições de execução dos revestimentos.

Ao longo da vida útil da edificação, a deterioração de um revestimento de argamassa pode ainda ocorrer por deficiências relacionadas à estrutura, como recalques diferenciais de fundações ou carregamentos estáticos e dinâmicos acima da capacidade de suporte do revestimento.

Segundo Carazek (2010), é usual que muitos dos fenômenos citados anteriormente ocorram simultaneamente.

A seguir, são discutidos alguns dos principais agentes de degradação dos revestimentos e relacionam-se alguns métodos de ensaio que podem ser utilizados para a avaliação do comportamento do revestimento perante a solicitação.

Penetração de Água

Em pesquisa realizada pelo IPT, em 1982, foi constatado que 50% dos problemas patológicos observados em casas térreas e 86% dos problemas em apartamentos com idade entre 4 e 8 anos classificavam-se como relativos à umidade (PEREZ, 1988). Em outra investigação, realizada em 2004, foi observado que 58% das manifestações patológicas observadas nos primeiros 4 anos da edificação estavam relacionados à umidade (OLIVEIRA et. al. 2005). Verifica-se-se, portanto, que a umidade é um problema recorrente e responsável por até 2/3 dos problemas patológicos de uma edificação. Também se conclui que tanto sua presença como suas consequências não estão sendo corretamente avaliados na especificação de sistemas de revestimento.

A penetração de água em revestimentos pode ocorrer por capilaridade, por infiltração decorrente da ação da água da chuva, por condensação, umidade acidental ou por pressão de água.

A umidade por capilaridade está relacionada com a capilaridade do revestimento e é regida pela distribuição de poros e pela quantidade de umidade em contato com a alvenaria. O coeficiente de capilaridade da argamassa pode ser determinado por meio das especificações da NBR 15259/05 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade (ABNT, 2005). Para se efetuar o ensaio, realizam-se medições de acréscimo de massa em corpos-de- prova de argamassa previamente secos, após os tempos de 10

e 90 minutos em contato com a água. A partir dos valores obtidos, calcula-se o coeficiente de capilaridade da argamassa. Esse coeficiente, apesar de servir para a comparação da capilaridade entre argamassas (pois é determinado sob condições de cura padronizadas), pode não representar a capilaridade do sistema, composto pelo revestimento aplicado sobre um substrato, em razão da sinergia entre as propriedades dos constituintes, da influência da própria base (que é porosa e influencia fortemente a movimentação da água da argamassa durante sua cura), das condições de aplicação e das condições de cura da argamassa na permeabilidade do revestimento.

A umidade de infiltração decorrente da ação da água da chuva é consequência da ação conjunta da chuva e do vento e é regida pela capilaridade e difusão de umidade do revestimento, além da ação da força de gravidade e da energia cinética das gotas de chuva em frestas. Um método de ensaio para a verificação da estanqueidade de alvenarias à água da chuva é descrito no anexo C da NBR 15.575 - 4. O ensaio consiste na simulação de chuva dirigida a somente uma das faces de um corpo-de-prova (parede de 105 × 135 cm), no intuito de se verificar o tempo necessário até o aparecimento de umidade na face que não foi exposta à água. Outro tipo de ensaio consiste no método do cachimbo, prescrito pelo RILEM Test Method nº 11.4 – *Measurement of water absorption under low pressure*. Por meio desse ensaio mede-se a permeabilidade e a absorção de água da superfície. Entretanto, ele vem sendo criticado por abranger uma pequena área de contato, o que torna o resultado bastante variável, em função de juntas de assentamento ou falhas pontuais na execução do revestimento da alvenaria. Um terceiro método, considerado uma variação do método do cachimbo, está descrito no anexo D da NBR 15.575 – 4. O ensaio procura determinar a absorção de água pela parede, a partir da fixação de uma caixa estanque com abertura voltada para a superfície do revestimento. A caixa é preenchida com água e, após essa etapa, determina-se a absorção de água pela parede em várias idades, calculando-se o volume de água que penetra na alvenaria ao final do período.

A umidade de condensação é a umidade presente no ambiente que, quando em contato com uma superfície mais fria ou por meio da redução brusca da temperatura, condensa e precipita, formando uma película de água na superfície da parede, o que propicia o crescimento de micro-organismos que podem ser prejudiciais à saúde do usuário e promove a deterioração de materiais e equipamentos. Portanto, é desejável que os revestimentos internos

sejam permeáveis ao vapor de água. Um método de ensaio adotado para verificar a permeabilidade do revestimento ao vapor da água é o descrito na norma europeia NP EN 1015-19. Esse ensaio determina a permeabilidade da argamassa ao vapor, por intermédio de corpos-de-prova posicionados próximos a soluções salinas saturadas, que criam duas condições extremas de umidade, uma de 93,2% de umidade (nitrato de potássio) e outra de 12,4% de umidade (cloreto de litio). Durante o ensaio, são determinadas as variações de massa do corpo-de-prova.

Penetração de Emissões Gasosas (Gás Carbônico e Cloretos)

Dentre os agentes que mais afetam a durabilidade de materiais a base de cimento, pode-se citar a ação do dióxido de carbono e de íons cloreto. O CO_2 está presente na atmosfera e é responsável pela carbonatação dos produtos de hidratação do cimento (ANDRADE, 1992). Os íons cloreto são encontrados em aditivos e insumos contaminados, em ambientes marinhos e em determinados ambientes industriais.

A carbonatação consiste em transformar íons alcalinos, como os cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio, em sais de carbonatos desses elementos, pela ação ácida do dióxido de carbono presente no ar (CASCUDO e CARASEK, 2011). Em argamassas, a carbonatação provoca uma diminuição de porosidade e de massa, além de uma redução do volume, devido à retração por carbonatação e, em consequência, um aumento da densidade (CINCOTTO et. al., 2010). Carasek (2010) comenta que as argamassas de revestimento devem possuir a capacidade de absorver deformações, a qual pode diminuir sensivelmente em função da carbonatação. O estudo do efeito da carbonatação sobre as argamassas pode ser efetuado a partir de ensaios acelerados de carbonatação. Esse ensaio consiste em expor corpos-de-prova de argamassa previamente curados a uma atmosfera com determinada concentração de CO_2, por um período de tempo que pode chegar a alguns meses. Os teores de CO_2 utilizados nos ensaios acelerados têm sido na ordem de até 5%.

A penetração de cloretos é comum em regiões litorâneas, em função da exposição à água do mar direta ou indiretamente (ventos, por exemplo, podem carregar a névoa salina por alguns quilômetros da costa para o interior) (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A elevada solubilidade de alguns sais é

responsável pela facilidade com que são transportados pela água e percolam pelos materiais, sendo os mecanismos de cristalização e dissolução processos complexos e difíceis de controlar (AGOSTINHO, 2008 apud FERREIRA, 2010). Suas consequências são o aumento da higroscopicidade da alvenaria, a degradação da argamassa e a formação de florescências. Um ensaio para a verificação da penetração de cloretos é descrito na RILEM TC 166 – PCD. Embora o ensaio tenha sido desenvolvido para concretos, o método pode ser utilizado em argamassas e é similar ao método de absorção de água por capilaridade. Após selamento das laterais do exemplar, sua face inferior fica em contato com uma solução de NaCl a 3%, e determina-se a absorção capilar da solução ao longo do tempo.

Processos Químicos e Gases Agressivos

Os ambientes urbanos e industriais podem apresentar níveis de agressividade elevada para revestimentos de argamassa.

O ambiente urbano pode gerar chuva ácida. Segundo Lima (2011), os óxidos de enxofre, liberados na atmosfera por motores e indústrias, reagem com o vapor de água, produzindo ácido sulfúrico, que é diluído na água da chuva e dá origem à chuva ácida. Esta possui pH inferior a 4,5 e pode propiciar a dissolução da matriz cimenticia.

O meio ambiente industrial possui microclimas bastante peculiares, podendo resultar em ambientes mais agressivos que o ambiente marinho, em função da contaminação do meio ambiente por substâncias agressivas, como derivados de sulfato, monóxidos e dióxido de carbono na atmosfera (LIMA, 2011).

Processos Biológicos

Segundo Ferreira (2010), o crescimento de fungos, líquens, algas e outros organismos é comum em fachadas de edifícios, sendo percebido pelo surgimento de manchas escuras com cores de tonalidades preta, marrom ou esverdeada. A presença desses organismos pode gerar a deterioração de argamassas de revestimento, devido ao ambiente ácido que se forma durante o crescimento das colônias.

Segundo Shirakawa, Cincoto e Gambale (2007), os revestimentos de argamassa recém aplicados não são um meio favorável ao crescimento de fungos, em função de sua elevada alcalinidade. Entretanto, após a carbonatação,

o pH se reduz, gerando um ambiente propício para o desenvolvimento destes microorganismos. Embora os fungos necessitem de pH ácido para seu desenvolvimento pleno, em um pH em torno de 9, o revestimento já apresenta características favoráveis ao crescimento de alguns tipos de fungo. O desenvolvimento dos microorganismos, entretanto, só ocorre na presença de umidade e pode ser acelerado quando há presença de matéria orgânica.

A RILEM TC 183-MIB *Microbial impact on building materials – Wheathering and conservation - Techniques applied to the study of microbial impact on building materials* e a ASTM D5590-00 *Standard test method for determining the resistance of paint films and related coatings to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay* descrevem métodos de ensaio utilizados para a avaliação do desenvolvimento de microorganismos em revestimentos.

Cargas Estáticas e Dinâmicas

Os revestimentos estão sujeitos à ação de cargas estáticas e dinâmicas, provenientes de esforços causados pelo próprio peso, por carga acidental, pela ação do vento, de vibrações, de variações dimensionais decorrentes de gradientes térmicos e de variações de umidade. Além disso, frequentemente os revestimentos recebem solicitações decorrentes de deformações na estrutura de concreto, cujo projeto normalmente é realizado sem a avaliação das possíveis consequências em outras partes da construção, como as alvenarias. Fatores como o aumento da esbeltes das estruturas (que gera maior movimentação do edifício quando exposto à ação do vento) e como o aumento da resistência das estruturas de concreto (que diminui a porosidade do substrato de concreto armado, sob o qual é aplicado parte do revestimento de argamassa) colaboram para o surgimento de problemas em revestimentos.

Há um número reduzido de métodos de ensaio específicos para a estimativa do comportamento de revestimentos submetidos a cargas estáticas e dinâmicas, e os poucos normatizados no Brasil analisam situações muito peculiares. O anexo A da NBR 15.575-4 especifica um método para a determinação da resistência de sistemas de vedação verticais internos e externos às solicitações de peças suspensas. Tal ensaio consiste em submeter os sistemas de vedação vertical a esforços fletores e de cisalhamento solicitantes. Na norma, ainda é citado outro conjunto de ensaios, denominados “Resistência a impactos de corpo mole e Resistência a impactos de corpo duro”, que visam a determinar a resistência ao impacto dos sistemas de vedação vertical, por meio da

ação pendular de um corpo duro e de peso conhecido ao se chocar com o revestimento, ou de um corpo mole, na face externa da alvenaria. Uma forma de se avaliar danos na estrutura interna do revestimento consiste na avaliação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, cujo método é especificado na NBR 15.630.

Calor e Choque Térmico

Silva, Gleize e Gomes (2009) comentam que a fissuração de revestimentos em fachadas de edifícios é um dos fenômenos patológicos de maior incidência. Na grande maioria, as fissuras nos revestimentos de argamassa têm a origem associada à execução do revestimento de argamassa, a solicitações higrotérmicas e principalmente devido à retração hidráulica (BAUER et al, 1997). O consumo de cimento, a distribuição granulométrica dos agregados, o teor de finos, a quantidade de água de amassamento e outros fatores, como a resistência de aderência à base, a espessura da camada e a ação de agentes atmosféricos, são fatores intrínsecos à fissuração. Após a cura, o revestimento está sujeito a variações dimensionais proveniente de gradientes de temperatura, que podem superar a resistência à tração dos revestimentos e propiciar o aparecimento de fissuras.

Alguns ensaios vêm sendo utilizados para analisar a incidência de fissuras em argamassas e a fissuração em revestimentos. No estado fresco, Silva, Gleize e Gomes (2009) fizeram uma adaptação da ASTM C1579 – *Standard Method for Evaluating Plastic Shrinkage Craking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert*). O ensaio consiste em acompanhar a pega de argamassa em formas cujo fundo possui restrições à retração, que induzem a ocorrência de fissuras. Essas argamassas ficam por 20 horas em uma câmara com temperatura e umidade controladas e com circulação continua de ar, sendo monitorada a fissuração e a ocorrência da primeira fissura visível.

A NBR 13281 (2005) especifica ensaios de retração em barras moldadas em forma não absorvente, que servem para comparação da retração entre argamassas, mas não reproduzem o efeito da absorção de água pelo substrato nem a real evaporação de água para o meio, além de não permitirem a avaliação da retração durante o período de início de pega da argamassa, que pode ser muito expressiva.

Os resultados dos dois ensaios citados, entretanto, muitas vezes não podem ser extrapolados para revestimentos aplicados sobre substrato de cerâmica vermelha e já curados, sendo, portanto, pouco úteis para estimativas de durabilidade.

Para revestimentos de argamassa aplicados sobre substrato de alvenaria e já curados, o anexo E da NBR 15.575-4 especifica um procedimento de ensaio de resistência ao choque térmico, que consiste em submeter uma parede revestida a dez ciclos de aquecimento, seguidos de resfriamento por molhagem, no intuito de verificar a degradação ou ocorrência de fissuras no revestimento ao longo do processo. Esse procedimento será discutido de forma mais detalhada no item 2.1.

Na Tabela 2 é apresentada uma súmula de alguns ensaios relacionados à avaliação da durabilidade de revestimentos de argamassa.

Tabela 2. Sumário de ensaios relacionados à avaliação da durabilidade de revestimentos de argamassa.

Condição de Exposição	**Ensaio**	
	Nome	**Norma**
Umidade	Determinação da absorção de água por capilaridade	RILEM TC 116-PCD
	Método do Cachimbo (*Measurement of water absorption under low pressure*)	RILEM test method nº 11.4
	Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade	NBR 15.259
	Anexo C (estanqueidade à água de SVVE)	NBR 15.575-4
	Anexo D (permeabilidade à água de SVVIE)	NBR 15.575-4
	Método de ensaio de argamassas para alvenaria Parte 19: Determinação de permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas	NP EN 1015 - 19
Emissões Gasosas	Carbonatação	-
	Deterioração por cloretos	RILEM TC 116-PCD

Tabela 2. Continuação.

Condição de Exposição	Ensaio	
	Nome	**Norma**
Processo Biológicos	*Microbial impact on building materials: an overview*	RILEM TC 183-MIB
	Standard test method for determining the resistance of paint films an related coating to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay	ASTM D5590-00
Cargas estáticas e dinâmicas	Resistência à compressão e à tração na flexão	NBR 13.279
	Anexo A – determinação da SVVIE às solicitações de peças suspensas	NBR 15.575-4
	Anexo B – Verificação da resistência a indentação – método de ensaio (Impacto de corpo duro) e ensaio de corpo mole	NBR 15.575-4
	Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração	NBR 13.528
	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico por meio da propagação de onda ultrassônica	NBR 15.630
Calor e Vento	Anexo E – Verificação do comportamento de SVVE exposta à ação de calor e choque térmico	NBR 15.575-4
	Avaliação da fissuração das argamassas (adaptada da *Standart test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete* (*using a steel form insert*))	ASTM C1579-06

Dentre os diversos métodos de ensaio que, em conjunto, permitem a estimativa da durabilidade de revestimentos, será discutido a seguir o método de avaliação da resistência de revestimentos de argamassa expostos à ação de calor e choque térmico, tendo como base um programa experimental realizado com argamassas de revestimento com adição de resíduos de concreto, aplicadas sobre substrato de cerâmica vermelha, utilizando-se o procedimento especificado no Anexo E da NBR 15.575-4.

2. Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Adição de Filer Proveniente da Moagem de Concreto por Meio de Ensaio Acelerado de Exposição ao Calor e a Choque Térmico

Como parte das metas do subprojeto 2 - Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores, do projeto FINEP – INOVATEC, foi desenvolvido um método para a avaliação da durabilidade de argamassas com incorporação de resíduos de concreto. A seguir, é apresentado um resumo do método desenvolvido e dos ensaios utilizados para sua validação.

A degradação de determinado material ou componente pode ser estimada a partir de ensaios acelerados. Os ensaios acelerados procuram simular uma determinada condição de exposição que ocorre naturalmente, ao longo da vida útil da edificação, diminuindo o tempo em que a degradação decorrente da exposição irá surgir. Tal situação é obtida ao se diminuir o intervalo de tempo entre as ocorrências das contínuas exposições à determinada solicitação ou por meio do aumento da agressividade associada à determinada condição de exposição. No caso de revestimentos de argamassa sobre substratos típicos de edificações, a simulação da ação do calor e choque térmico reproduz os gradientes de temperatura a que o revestimento de uma parede do sistema de fechamento do edifício pode estar submetido, simultaneamente à ação decorrente da chuva que pode, em pouco tempo, diminuir sensivelmente a temperatura do revestimento, além de propiciar a diminuição da sua resistência mecânica.

A definição dos parâmetros do ensaio acelerado, entretanto, deve ser precedida por um estudo sobre as condições de exposição a que o revestimento estará submetido ao longo de sua vida útil, pois deve haver uma clara relação com as solicitações decorrentes do clima local ao longo de grandes períodos de exposição. Ensaios utilizando parâmetros climáticos de países europeus, por exemplo, simulam a exposição da alvenaria a baixas temperaturas (onde ocorrem situações de congelamento e degelo). Em climas com temperaturas mais amenas, como o que ocorre no Brasil, o ensaio deve simular gradientes típicos entre as temperaturas atingidas durante o dia e a noite, que interagem com o revestimento segundo os processos de transferência de calor, expostos na Figura 2.

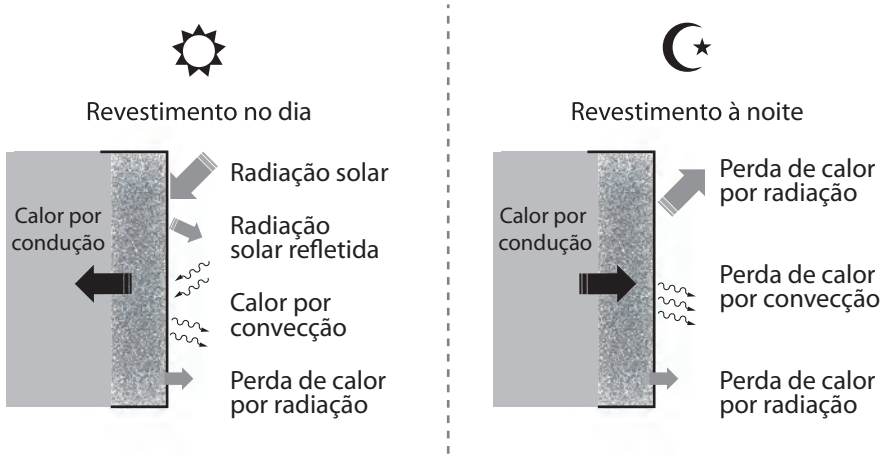


Figura 2. Processos de transferência de calor em revestimentos. Fonte: Esquivel (2009).

Os ciclos de aquecimento e resfriamento realizados em ensaios acelerados tem a função de degradar o revestimento. A deterioração decorrente da ação de ciclos térmicos depende principalmente do coeficiente de expansão térmica (CET) dos materiais constituintes da argamassa, de sua condutividade térmica e do gradiente de temperatura utilizado.

Segundo Schulson, Swainson e Holden (2001), o CET é um parâmetro fundamental para se determinar a tensão interna entre as diferentes fases de materiais à base de cimento e possibilita prever possíveis danos induzidos pelas diferentes dilatações térmicas de cada fase. Os constituintes da pasta de cimento possuem diferentes valores de CET. A contração térmica diferencial entre o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gera tensões internas no interior da pasta de cimento em estado endurecido, quando submetida a gradientes térmicos. (SCHULSON; SWAINSON; HOLDEN, 2001). A diferença de CET entre os materiais constituintes da argamassa também gera tensões diferenciais. Valores típicos para CET da pasta de cimento em estado endurecido são de 15 a 20 × 10^{-6}/°C (MEYERS, 1940), enquanto valores para o CET de agregados variam de 5 a 12 × 10^{-6}/°C (GHABEZLOO, 2011). O valor do CET relativo ao substrato sobre o qual a argamassa de revestimento é aplicada também exerce grande influência e varia em função do tipo de substrato. Além das características dos constituintes,

a porosidade do revestimento também influencia essa propriedade. Qiang Zeng *et al.* (2011) estudaram o CET em pastas de cimento com ar incorporado e em argamassas com porosidades diferentes. Os resultados mostram que a porosidade tem efeito significativo sobre a deformação térmica e que o CET diminui com o aumento da porosidade.

O gradiente de temperatura a ser adotado no ensaio acelerado precisa ser maior que o observado em situações reais, de modo a aumentar a velocidade do processo de degradação e permitir respostas comparativas entre os revestimentos em pequenos períodos de tempo. Por outro lado, deve haver o cuidado de não se gerar alterações significativas na composição química dos materiais, que podem impedir o estabelecimento de uma correlação entre o ensaio acelerado e o fenômeno real que está sendo reproduzido. Em particular, a temperatura máxima a ser utilizada deve ser estipulada com cuidado. Faure *et al.* (2011) observaram que a secagem de pastas de cimento em estufa a 80 °C permite a evaporação da água livre com mínima decomposição de silicato de cálcio hidratado, mantendo as características das pastas. Entretanto, segundo Gallé (2001), temperaturas de secagem entre 60 °C e 105 °C resultam em aumento da porosidade capilar, decorrente de estresse capilar, desidratação de hidratos do cimento (etringita, AFm, C-S-H) e geração de microfissuras decorrentes do estresse hidrotérmico interno.

Kim *et al.* (2003), estudando a condutividade térmica em concreto, argamassa e pasta de cimento, identificaram sete fatores que afetam a condutividade térmica: idade, volume de agregados, quantidade de cimento, tipos de aditivos, fração de finos dos agregados, temperatura e umidade da amostra. Os autores relatam que o volume de agregados e a umidade da amostra são os principais fatores que alteram a condutividade das amostras a base de cimento.

Em ensaios acelerados, pode ocorrer a ação simultânea de dois ou mais fatores de degradação. Alguns ensaios de durabilidade de revestimentos da envoltória da edificação fazem o resfriamento por molhagem, gerando um choque térmico que simula a ação da chuva em uma fachada aquecida.

Na Tabela 3, são sumarizados alguns parâmetros de métodos de ensaio acelerado utilizados para a avaliação da durabilidade por gradiente térmico.

Tabela 3. Parâmetros de alguns métodos de ensaio para avaliação da durabilidade por gradiente térmico.

Norma/ Método	Equipamento	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Número de ciclos	Tempo de duração do ciclo
NBR 15.575-4 Anexo E	aquecimento com painel radiante e resfriamento com aspersão de água	20±03	80±03	10	aquecimento + 1 h + resfriamento
UNE-EN 13687-2:2002	aquecimento por 5h45min e aspersão de água por 15min	21±2	60±10	Especificado na prEN 1504	6 h
prEN 16306	-	20	80	20	24h

Obs.: A norma brasileira tem o objetivo de avaliar sistemas de fechamento vertical de edifícios; a norma UNE tem o objetivo de avaliar a compatibilidade térmica de produtos e sistemas de reparo, incluindo pastas, argamassas, concretos e sistemas de proteção superficial; a norma prEN tem o objetivo de avaliar a deterioração de placas de mármore em fachadas.

Observa-se que os gradientes de temperatura recomendados pelas normas citadas não são muito diferentes, variando entre 20°C e 80°C. As normas recomendam a adoção de choque térmico (simulando a ação da chuva sobre uma fachada muito aquecida) e procuram especificar o procedimento de ensaio que melhor represente a situação real de exposição a que o sistema estará submetido ao longo de sua vida útil.

2.1. Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Filer Reciclado de Concreto por Meio do Ensaio Acelerado de Exposição ao Calor e a Choque Térmico Especificado no Anexo D da NBR 15575-4

A NBR 15575-4 especifica um ensaio para a avaliação do desempenho de revestimentos verticais de edifícios que pode ser utilizado em alvenarias revestidas com argamassa. O ensaio consiste em submeter uma parede revestida a 10 ciclos de aquecimento com o uso de painel radiante, seguidos de resfriamento por choque térmico decorrente da aspersão de água. No

programa experimental utilizado neste exemplo, foram realizadas algumas alterações no método de ensaio previsto na norma brasileira, como a adoção de 40 ciclos de exposição, visando a uma maior degradação do revestimento.

Além da definição do método utilizado para o envelhecimento acelerado, é de extrema importância uma correta especificação das formas de avaliação do dano causado pelos ciclos de envelhecimento acelerado. A NBR 15575-4 especifica como parâmetros de avaliação o "aparecimento de fissuras, trincas, deslocamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo-de-prova", e a "avaliação do deslocamento horizontal após 45min de estabilização da temperatura superficial em (80±3ºC) e imediatamente após o resfriamento", ao longo de 10 ciclos de ensaio. A ocorrência de fissuras ou de algum dos demais sintomas de degradação citados é suficiente para que o sistema seja reprovado no requisito durabilidade, segundo a norma. Entretanto, a simples avaliação visual do revestimento e da deformação existente no sistema não fornecem informações sobre as alterações de microestrutura que podem estar ocorrendo ao longo do processo de envelhecimento a que a amostra está sendo submetida, fato que geralmente impossibilita uma análise quantitativa da diferença de desempenho entre os diversos sistemas de revestimento.

Com vistas a permitir uma melhor identificação das eventuais alterações de propriedades do sistema de revestimento em função do ensaio de envelhecimento, é necessário que sejam realizados outros ensaios de avaliação, além dos citados na referida norma. Nesse sentido, serão discutidos a seguir algumas alternativas de ensaios para esse tipo de avaliação.

2.2. Métodos Propostos para a Avaliação da Degradação do Revestimento de Argamassa

a. Avaliação da Fissuração nos Revestimentos.

A NBR 15575-4 impõe como parâmetro de aceitação de desempenho o não "aparecimento de fissuras e trincas", a avaliação da fissuração permite uma comparação mais objetiva para o desenvolvimento de traços de argamassa com incorporação de resíduos, sendo possível avaliar de que modo diferentes materiais e parâmetros de dosagem exercem influência na fissuração de revestimento, seja ao longo do processo de cura ou da vida útil dos revestimentos, esta última simulada pelo ensaio de envelhecimento acelerado.

Um método proposto para esta avaliação consiste no registro fotográfico da superfície do revestimento, com uso de câmera de alta resolução, e posterior determinação da área fissurada. Esse método permite a avaliação da evolução do nível de fissuração ao longo do tempo e a comparação deste parâmetro entre os diversos sistemas de revestimento utilizados.

b. Determinação da Absorção de Água do Sistema Composto pelo Revestimento Aplicado Sobre a Base de Cerâmica Vermelha.

Segundo Caré (2008), as modificações decorrentes da ciclagem térmica podem ser constatadas por meio de alterações na porosidade capilar dos revestimentos. O método de ensaio utilizado para a determinação da absorção de água por capilaridade foi baseado no procedimento descrito na recomendação RILEM TC 116-PCD, e consiste na determinação da capilaridade à água por fluxo unilateral no revestimento. Dessa forma, para a realização desse teste, foram extraídos corpos-de-prova circulares da alvenaria (com diâmetro de 50mm, e altura correspondente à espessura do revestimento somada à do substrato cerâmico, visualizado na Figura 3a). Esses exemplares foram secos em estufa, tiveram sua lateral selada e posteriormente foram submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, por imersão parcial em recipiente com água. Em períodos determinados, os exemplares são pesados e a diferença de massa é utilizada para o cálculo da absorção capilar. Como resultado do ensaio, consegue-se traçar uma curva de absorção capilar, na qual é possível identificar o momento em que a água absorvida atinge o substrato, e realizar um estudo exclusivo da permeabilidade do revestimento. Além da determinação da capilaridade, o ensaio permite uma estimativa do volume total de poros capilares dos sistemas ensaiados. A figura 3 demonstra detalhes do ensaio:

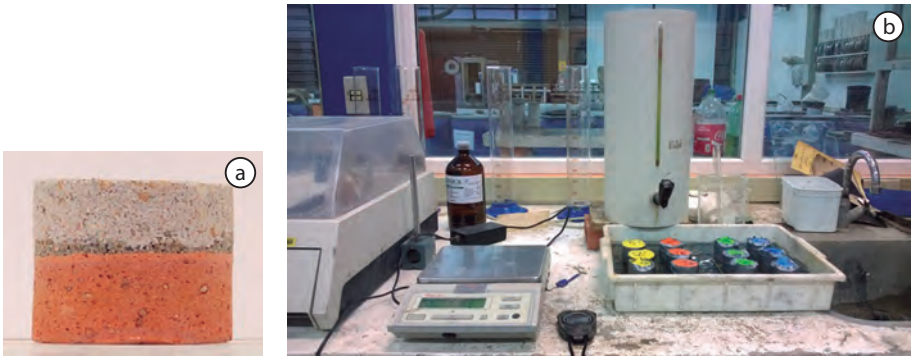


Figura 3. Corpo-de-prova para ensaio de capilaridade (a) e visualização do procedimento de ensaio (b).

Uma variação ao ensaio adotado é o método proposto pelo Anexo D da NBR 15.575-4, que permite a avaliação da permeabilidade à água de sistemas compostos por alvenaria e revestimento. Entretanto, esse método permite a evaporação de água do sistema durante a execução do ensaio e sofre grande influência do preparo da base (chapisco) e do tipo de bloco cerâmico utilizado, sendo impossível avaliar exclusivamente a influência do revestimento.

c. Determinação da Resistência de Aderência à Tração e da Forma de Ruptura por Tração.

A determinação da resistência de aderência à tração foi realizada segundo as especificações da NBR 13528 (ABNT, 2010). Esse método permite avaliar se a resistência de aderência do revestimento se encontra acima dos parâmetros especificados pela Norma NBR 13749 (ABNT, 2013) (os limites inferiores variam entre 0,2 e 0,3 MPa, dependendo do local e do tipo de acabamento do sistema de vedação vertical), antes e após a conclusão dos ciclos do ensaio acelerado.Também possibilita estimar a perda de aderência ao longo do ensaio. Entretanto, como a resistência de aderência é influenciada por diversos fatores, como as características da argamassa, as características do substrato utilizado e as condições de aplicação de revestimento (como a energia de aplicação e as condições de evaporação de água), é comum ocorrer uma elevada dispersão de resultados, que segundo Carasek (2012) varia entre 10% e 60%. A autora considera aceitáveis ensaios cujo coeficiente de variação seja igual ou inferior a 25%. A elevada variação dos resultados muitas vezes impede uma análise conclusiva sobre o comportamento do revestimento.

No programa experimental , foram realizados 18 ensaios em cada sistema, amostragem superior à especificada na norma.

A NBR 13528 (ABNT, 2010) também especifica que a forma de ruptura em cada ensaio de arrancamento seja identificada, considerando que rupturas do tipo coesiva (ocorridas no interior da argamassa ou do substrato) são as mais desejáveis, em detrimento de rupturas do tipo adesiva (em interfaces do sistema), que estão associadas ao maior risco de manifestações patológicas. Desta forma, neste programa experimental, também foi identificada a forma de ruptura de cada teste de arrancamento, por meio de fotografia digital de alta resolução, separação da imagem por escalas de cores e contagem de pixels.

d. Avaliação do Volume de Vazios na Argamassa.

A determinação do volume de vazios existentes na argamassa de revestimento foi realizada a partir do volume de vazios visualizado em imagens fotográficas digitais de alta resolução de exemplares extraídos do revestimento, validado pelo volume de vazios observado em imagens obtidas com o uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV) de exemplares extraídos da mesma argamassa e ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. O método adotado consiste na extração de testemunhos do sistema composto pelo revestimento aplicado sobre a base de cerâmica vermelha, no corte transversal dessas amostras, e a posterior análise da quantidade de vazios existente na argamassa e na área de interface entre a argamassa e o substrato, por meio de fotografia digital de alta resolução, separação da imagem por escalas de cores e contagem de pixels.

Outro método utilizado foi a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, que permite, de forma indireta, avaliar o aumento da porosidade do revestimento em função do aparecimento de fissuras.

e. Determinação da Dureza Superficial por Meio de Durômetro.

A determinação da dureza superficial tem o objetivo de verificar alterações de dureza decorrentes do processo de deterioração do revestimento devido aos ciclos térmicos. Estima-se que ocorra uma diminuição gradativa da dureza superficial do revestimento submetido ao ensaio de envelhecimento acelerado, embora em algumas situações seja possível ocorrer o inverso, em consequência de carbonatação ou de hidratação da parcela de aglomerantes não hidratados por ocasião do início dos ensaios. O método utilizado baseou-se na ASTM D 2240-5 e consiste na determinação da dureza superficial do revestimento com

Durômetro Shore tipo D. A dureza superficial foi estimada a partir da média aritmética entre 12 determinações na mesma superfície.

2.3. Programa Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Foram avaliados quatro tipos de revestimento aplicados sobre um substrato de blocos de cerâmica vermelha. Os revestimentos consistem em uma argamassa no traço 1: 1: 6 (cimento : cal em pasta: agregado miúdo, em volume) diferenciados pelo teor de fíler proveniente da moagem de concreto presente no agregado miúdo. Os aglomerantes utilizados foram o cimento Portland CP II-F-32 e a cal hidratada CH I. Como agregados, foram utilizados uma areia quartzosa, extraída em rio, lavada, com granulometria entre as peneiras 2.4 mm e 0,075 mm (considerada como areia de referência) e filer proveniente da moagem de concreto com fc=37 MPa, adicionado ao agregado de referência nos teores de 2%, 4,5%, 7% e 9,5%, em massa. Após 72 horas do preparo do substrato de cerâmica vermelha com chapisco no traço 1: 3, em volume, foi aplicado o revestimento, cuja cura foi realizada em sala climatizada com temperatura de (23±2) ºC e umidade de (60±10) % por 28 dias. A caracterização detalhada dos materiais e dos resultados dos ensaios realizados pode ser consultada em Sentena (2015).

Como o foco do trabalho foi a avaliação da degradação do sistema de revestimento por meio de ensaios acelerados, um parâmetro inicial para a escolha dos sistemas a serem testados foi a inexistência de fissuras, trincas, ou outras deteriorações na face do revestimento, imediatamente após o período de cura, além da existência de uma resistência de aderência à tração, medida segundo especificado na NBR 13528 (ABNT, 2010), superior a 0,3MPa. A avaliação do comportamento dos revestimentos foi realizada antes e depois dos quarenta ciclos de envelhecimento acelerado.

A súmula dos resultados obtidos utilizando-se os métodos descritos é realizada a seguir.

- Após exposição a 40 ciclos de aquecimento por painel radiante e resfriamento por choque térmico por aspersão de água, não foi constatado nenhum dano superficial relacionado na norma de desempenho, como a ocorrência de fissuras, trincas e deteriorações superficiais visíveis. Sob

o ponto de vista do desempenho, segundo a referida norma, todos os revestimentos foram aprovados.

Entretanto, é lógico estimar que os revestimentos com argamassa e resíduos de concreto devem ter sofrido deterioração, embora esta não seja possível de ser constatada a partir da análise visual da superfície do revestimento.

- Na figura 4, é possível visualizar os gráficos de absorção de água por capilaridade do sistema composto pelo revestimento aplicado sobre a base de cerâmica vermelha, antes e após o ensaio acelerado.

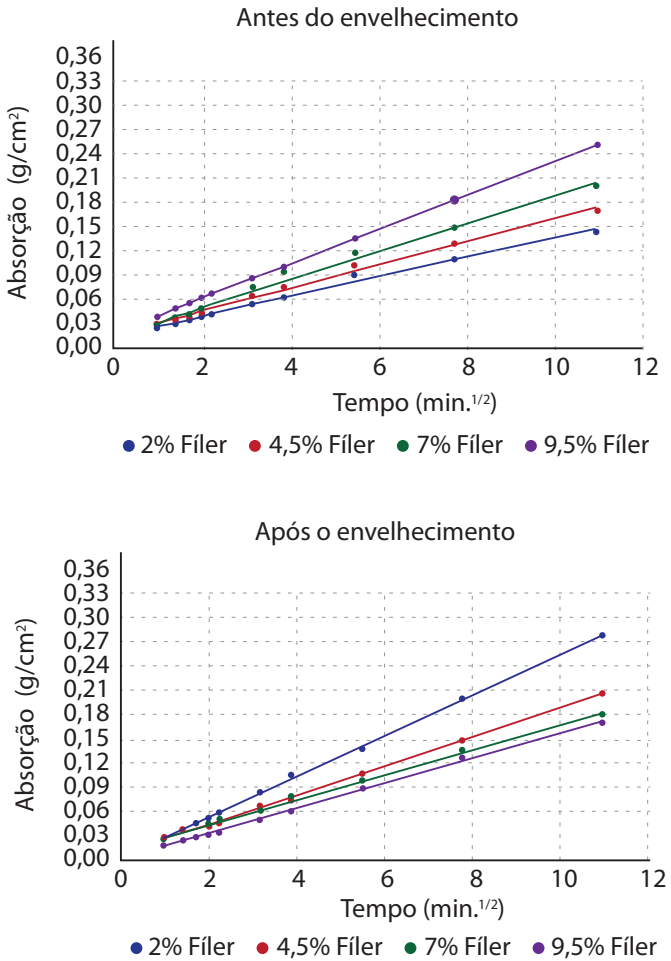


Figura 4. Absorção por capilaridade dos revestimentos antes (acima) e após (abaixo) o envelhecimento acelerado por ciclos térmicos.

Os resultados demonstram um aumento no volume de poros capilares em praticamente todos os traços de revestimento utilizados (exceto no traço com 9,5% de filer). Apesar do aumento de poros capilares ser coerente com a degradação dos revestimentos, verifica-se que o método não consegue avaliar adequadamente o nível de degradação dos revestimentos. Os valores de capilaridade não permitiram uma distinção entre os exemplares ciclados e não ciclados.

- Na tabela 4, podem ser visualizados os valores de resistência de aderência obtidos antes e após o ensaio acelerado.

Tabela 4. Médias das resistências de aderência dos revestimentos.

teor de fíler (%)	Antes do envelhecimento		Após o envelhecimento	
	número de leituras	Resistência de aderência e Coeficiente de Variação (MPa)	número de leituras	Resistência de aderência e Coeficiente de Variação (MPa)
2,0	12	0,88 (0,17)	12	0,93 (0,27)
4,5	12	0,94 (0,32)	13	0,92 (0,27)
7,0	13	0,77 (0,30)	11	0,54 (0,26)
9,5	12	0,94 (0,21)	16	0,57 (0,31)

A avaliação do desempenho dos revestimentos a partir dos resultados de resistência de aderência foi pouco conclusiva. Embora tenham sido previstos 18 ensaios em cada revestimento, foi possível determinar somente o valor da resistência de aderência em cerca de ¾ destes ensaios, em função de problemas durante a realização do corte com disco diamantado, atividade prévia ao ensaio de tração. Apesar disso, o número de exemplares restantes foi sempre superior ao especificado pela norma. A despeito dos cuidados tomados na execução do revestimento e durante o ensaio, os coeficientes de variação foram relativamente elevados (na ordem de 0,27 MPa, ou 33% da resistência de aderência média), fato que pode ter sido influenciado pelo uso de filer de concreto na composição da argamassa.

Aparentemente, existe uma queda de resistência de aderência nos revestimentos com teores mais altos de adição de filer, porém os coeficientes de variação obtidos não permitem uma conclusão consistente.

- Na tabela 5, podem ser visualizados a incidência de cada forma de ruptura antes e após o ensaio acelerado.

Tabela 5. Incidência da forma de ruptura.

Característica	Argamassa (%)	Interface Arg./ chap. (%)	Interface Chap./ subst. (%)	Substrato (%)
Não ciclado	46,72	42,44	10,23	0,60
Após ciclagem	58,03	37,40	4,43	0,14

A exposição a ciclos térmicos alterou a forma de ruptura nos ensaios de resistência de aderência, havendo um acréscimo na quantidade de rupturas coesivas na argamassa, o que demonstra que a área que sofreu maior degradação foi o revestimento de argamassa. Esse fenômeno, para os materiais utilizados no programa experimental, superou o efeito do esforço de cisalhamento decorrente de movimentação diferencial entre a argamassa e o substrato ao longo dos ciclos térmicos.

- A deterioração da argamassa de revestimento é comprovada a partir da estimativa do volume de vazios da argamassa, que consta na Tabela 6:

Tabela 6. Estimativa da quantidade de vazios nas argamassas de revestimento.

Teor de fíler (%)	Antes do envelhecimento	Após o envelhecimento
2,0	8,86	18,54
9,5	22,93	25,84

Observa-se que, nos dois traços avaliados, houve um aumento na quantidade de vazios do revestimento, corroborando a hipótese de deterioração do revestimento em função dos ciclos térmicos.

As determinações de velocidade de onda ultrassônica não apresentaram diferenças significativas entre os exemplares ciclados e não ciclados. Esse fato demonstra que o tamanho das fissuras geradas nos revestimentos é inferior à amplitude da onda ultrassônica utilizada, e que os parâmetros adotados para o ensaio não apresentaram sensibilidade suficiente para esta análise.

- Na Tabela 7, são visualizados os valores médios de dureza superficial, obtidas com uso de durômetro Shore D.

Tabela 7. Média dos resultados de dureza superficial por durômetro Shore D.

Teor de fíler (%)	Antes do envelhecimento	Após o envelhecimento
2,0	75	70
4,5	77	69
7,0	77	71
9,5	78	69

Em todos os revestimentos houve uma queda de dureza superficial, em consequência do ensaio de envelhecimento.

Tendo em consideração os resultados obtidos, pode-se constatar que uma adequada avaliação da degradação do revestimento exige a realização de ensaios não previstos nas normas que especificam o procedimento de envelhecimento acelerado, como a NBR 15575-4. Os ensaios utilizados para a avaliação devem ser escolhidos de modo a permitir a avaliação das alterações nas propriedades dos revestimentos em função da exposição aos ciclos térmicos.

A respeito das propriedades avaliadas neste programa experimental, podemos tecer as seguintes considerações:

- a avaliação da superfície do revestimento por meio da visualização de fissuras ou deterioração superficial é um parâmetro para a avaliação do fim da vida útil de um revestimento, mas não permite uma avaliação de danos que ocorrem em nível de microestrutura do sistema ao longo do processo;
- a determinação da resistência de aderência segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010) é um parâmetro qualitativo valioso para a avaliação da durabilidade, porém apresenta grande dispersão de resultados (que pode ser ampliada com a adição de resíduos), o que muitas vezes impede a obtenção de resultados conclusivos; a avaliação da forma de ruptura é um fator complementar que pode trazer informações importantes sobre a deterioração da argamassa de revestimento;

- a determinação da capilaridade e do teor de água absorvida pelo sistema complementam os ensaios de resistência de aderência, porém apresentam elevada dispersão de resultados;
- a estimativa do volume de vazios permite avaliar o dano decorrente do envelhecimento acelerado e pode ser um importante instrumento neste sentido;
- a dureza superficial permite a determinação da existência de dano na superfície, decorrente dos ciclos térmicos, porém, no caso em questão, não foi suficiente para distinguir os revestimentos entre si e não apresentou relação com os demais resultados.

3. Conclusão

A estimativa da durabilidade de revestimentos de argamassa com incorporação de resíduos é complexa e exige a realização de diversos ensaios simultâneos. No Brasil, o método normalizado para a realização da degradação é descrito no anexo D da NBR 15.575-4, que propõe a realização de um ensaio acelerado com ciclos contínuos de aquecimento com painel radiante e resfriamento por meio de choque térmico decorrente da aspersão de água. A norma especifica que sistemas que não apresentem danos visíveis na superfície e deformações excessivas após 10 ciclos tem desempenho adequado para a construção de edifícios, porém não gera dados que permitam a comparação do nível de degradação dos revestimentos ou uma estimativa de vida útil para o sistema. Procurando contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação mais ampla, foram propostos diversos métodos de ensaio para a comparação dos revestimentos antes e após a ciclagem, contemplando-se parâmetros mecânicos (resistência de aderência e tipo de ruptura no arrancamento, dureza superficial), físico (absorção de água por capilaridade) e de estrutura interna da argamassa (volume de vazios). Verificou-se que o uso exclusivo de um único parâmetro de avaliação dificilmente permitirá uma avaliação conclusiva sobre o desempenho do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP pelo auxílio concedido para a execução da parte experimental deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. 1 ed. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. Editora PINI, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *C1579 – Standard Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert*).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D5590-00 – *Standard test method for determining the resistance of paint films and related coatings to fungal defacement by accelerated four-week Agar plate assay.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575-4* – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13749* – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13528* – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15630* – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15630* – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13281* – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15259/05* – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13279* – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

BONIN, L. C.; CARASEK, H.; CINCOTTO, M. A.; SOUZA, U. E. L. Massa critica pela qualidade. In: *Téchne*. 41 ed. São Paulo: Editora PINI, julho 1999.

CARASEK, H. *Avaliação de resultados do ensaio de resistência de aderência de revestimentos de argamassa*. Téchne, n. 185, 2012. disponível em: http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/185/artigo286939-1.aspx

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, p. 893-944.

CARÉ, S. Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes. *Construction and Building Materials* 22, p. 1560-1573, 2008.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da Carbonatação no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto*: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 849-885.

CIB Report 64 – Working with the performance approach in building, CIB W60, (1980). 30p.

European Standard. EN 1015-19: Methods of test for mortar for masonry Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. 2000

European Standard. UNE-EN 13687-2: Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la compatibilidad térmica. Parte 2: Ciclos de enfriamiento brusco a partir de una temperatura elevada. 2002, 10p.

European Standard. prEN 16306 : Méthodes d'essai pour les pierres naturelles. Détermination de la résistance des marbres aux cycles thermiques et à l'humidité. 2012.

FAURE, P.; CARÉ, S. Application of NMR relaxation and MRI characterization to the determination of porosity and water content in cement pastes subjected to drying. *Cement and Concrete Research*. 2011.

FERREIRA, B. B. D. *Tipificação de patologias em revestimentos argamassados*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

FOLIENTE, G. C. Developments in performance-based building codes and standards. *Forest products journal*, vol. 50, n. 7/8, p. 12-21, 2000.

GHABEZLOO, S. Micromechanics analysis of thermal expansion and thermal pressurization of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research,* 2011.

ISO 6241 - *Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered. 1984.*

KIM, K.; JEON, S.; KIM, J.; YANG, S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Composites*, Essex, n. 33, p. 363-371, 2003.

LIMA, M. G. Ações do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto*: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1 , p. 733-772.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. R. M. *Concreto*: Microestrutura, Propriedades e Materiais. Editora Ibracon, 2008.

MEYERS, S. L. Thermal coefficient of expansion of Portland cement: long time tests. *Ind Eng Chem*, 32, p. 1107-12, 1940.

OLIVEIRA, L. A.; MOREIRA, T. M.; MITIDIERI FILHO, C. V. Estanqueidade de fachadas à água da chuva. *Revista de Tecnologia das Construções* – Techne. nº 106, jan. 2005. Ed. Pini. São Paulo.

PEREZ, A. R. Umidade nas Edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas (1ª parte). São Paulo. PINI. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Edificações - IPT. 1988. p. 571-578.

RILEM Test Method nº 11.4 – Measurement of water absorption under low pressure.

RILEM TC 166–PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. Materials and structures, vol 32, 1999, p163-173. P PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of RILEM TC 183-MIB Microbial impact on building materials: Weathering and conservation - Techniques applied to the study of microbial impact on building materials

SHIRAKAWA, M. A.; CINCOTTO, M. A.; GAMBALE, W. Influência do crescimento de fungos na carbonatação de argamassas. In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de argamassas. Anais. Recife: ANTAC, 2007.

SCHULSON E. M.; SWAINSON I. P.; HOLDEN T. M. Internal stress within hardened cement paste induced through thermal mismatch calcium hydroxide versus calcium silicate hydrate. *Cem Concr Res*, 31, p. 1785-91, 2001.

SILVA, N. G.; GLEIZE, J. P.; GOMES, L. A. Metodologia para avaliação da fissuração em revestimentos de argamassa. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de argamassas. Anais, Curitiba: ANTAC, 2009.

QIANG, Z; KEFEI, L.; TEDDY, F.; PATRICK, D. Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 28, p. 468-475, 2012.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C007

7 Avaliação de Metodologias de Envelhecimento em Painéis de Partículas de Bagaço de Cana-de-açúcar para Aplicação em Sistemas Construtivos

Nubia Mireya Garzón Barrero
Juliano Fiorelli
João Adriano Rossignolo
Holmer Savastano Junior

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os conceitos relacionados à durabilidade, aos mecanismos e aos agentes de degradação que interferem no desempenho de painéis particulados, assim como as principais metodologias usadas para a sua avaliação. Além disso, o trabalho também pretende avaliar o desempenho físico-mecânico e a durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente à base de óleo de mamona e compará-los com painéis de partículas de madeira comerciais (*Medium Density Particleboard* - MDP) e resina de uréia-formaldeído. Para tanto, os painéis fabricados com partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) e os painéis comerciais de partículas de madeira (MDP) foram revestidos superficialmente com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. Finalmente, são apresentados os resultados do acompanhamento das propriedades mecânicas antes e após os ensaios de envelhecimento por exposição natural, de envelhecimento acelerado e de avaliação das condições isoladas de degradação.

Palavras-Chave: Resíduos agroindustriais, durabilidade, envelhecimento acelerado, painéis particulados, mamona.

1. Introdução

Atualmente, com a crescente preocupação mundial com a sustentabilidade, a utilização dos recursos naturais renováveis tem sido uma temática discutida pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Esses recursos representam uma fonte alternativa de grande potencial econômico, tornando-se vital para a sobrevivência das indústrias em um mercado globalizado e competitivo. Segundo Campos (2005), para que haja desenvolvimento sustentável, é fundamental atender as necessidades básicas das pessoas, oferecer condições de concretizar as aspirações por uma vida melhor, manter os padrões de consumo dentro do limite das possibilidades ecológicas a que todos possam aspirar, garantir o crescimento econômico em regiões onde tais necessidades se limitam no âmbito único de exploração, conservar as espécies vegetais, minimizar os impactos adversos sobre a qualidade do ar, da água e de outros elementos naturais, preservando a integridade global do ecossistema.

A disposição final dos resíduos sólidos gerados na agricultura e nas atividades de produção industrial apresenta problemas em países em desenvolvimento. As maiores quantidades de resíduos gerados de origem agroindustrial são bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, fibra de coco e fibra de juta, entre outros (MADURWAR et al., 2013). A reutilização desses resíduos como materiais renováveis para a construção civil pode apresentar uma solução não só para resolver problemas de poluição ambiental, mas também para diminuir os problemas de alto custo de materiais para a construção.

As indústrias de painéis aglomerados e de fibras, no Brasil, utilizam preferencialmente cavacos de madeira de reflorestamento provenientes de *Pinus* e de algumas espécies de eucalipto, tendo em vista o melhor controle de homogeneidade da matéria-prima e consequentemente a melhor qualidade do produto final. Porém, os materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agroindustriais vêm sendo uma alternativa para fabricação de painéis (SARTORI, 2012), haja vista o crescente aumento da produção agrícola. A agroindústria brasileira apresenta inúmeros resíduos lignocelulósicos com potencialidades de aproveitamento para fabricação de novos materiais, por exemplo, a fibra de coco (BRITO et al., 2004, PASSOS, 2005 e FIORELLI et al., 2012), a casca de amendoim (PABLO et al., 1975; CARASCHI et al., 2009; GATANI, 2014) e o bagaço de cana-de-açúcar (WIDYORINI et al., 2005; CONTRERAS et al., 2006; SILVA et al., 2008; CARASCHI et al ., 2009; BATTISTELLE et al., 2009 e FIORELLI et al.,

2013). A utilização de resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana-de-açúcar, em conjunto com os polímeros naturais, para produção de elementos construtivos para a construção civil, apresenta-se como uma oportunidade de agregar valor aos resíduos da indústria sucroalcooleira brasileira e introduzir no mercado da construção civil materiais mais sustentáveis. No entanto, esses materiais deverão garantir desempenho físico-mecânico satisfatório e durabilidade, conforme os requisitos técnicos e as necessidades do usuário. Além do aproveitamento do caldo da cana-de-açúcar para a produção de etanol e açúcar, o bagaço pode ser utilizado para cogeração de energia limpa, por meio de processos de combustão e de gaseificação. No entanto, o bagaço de cana-de-açúcar também pode ser reaproveitado para produção de compósitos particulados.

O presente capítulo apresenta os conceitos relacionados com a durabilidade e o desempenho dos painéis particulados. O estudo se justifica pela necessidade de se identificarem os agentes e os mecanismos de degradação que podem afetar o desempenho físico-mecânico dos compósitos de bagaço de cana-de-açúcar aglomerado com resina bicomponente poliuretana à base de óleo de mamona e de madeira com resina ureia-formaldeído. A partir dessa temática, almeja-se compreender o comportamento do material em determinadas condições de exposição e contribuir para avançar no desenvolvimento de produtos sustentáveis que apresentem uma boa qualidade para aplicações práticas de engenharia. Além disso, apresentam-se os resultados obtidos em diferentes metodologias de avaliação de durabilidade, em laboratório e em exposição natural, visando a identificar sua viabilidade técnica como componente construtivo.

2. Painéis de Partículas de Madeira

A tecnologia de produção de painéis de partículas aglomeradas desenvolveu-se principalmente após a Segunda Guerra Mundial, em decorrência da escassez da matéria-prima e, também, por conta da redução das perdas ocorridas tanto na indústria madeireira como na exploração florestal (MENDES et al., 2003). Os painéis de madeira surgiram da necessidade de amenizar as variações dimensionais da madeira maciça, diminuir seu peso e custo e manter as propriedades isolantes, térmicas e acústicas da matéria prima original. Adicionalmente, suprem uma necessidade reconhecida no uso da madeira serrada, com a ampliação da sua superfície útil, através da expansão de uma de suas dimensões (a largura), para otimizar a sua aplicação (IPT, 2003).

De acordo com a norma NBR 14810 (2002), painéis de partículas de madeira ou MDP (*Medium Density Particleboard*), ou PPMD (Painel de Partículas de Média Densidade) têm espessura entre 3 a 50 mm e são constituídos por partículas aglomeradas de madeira, resinas naturais ou sintéticas e termofixas, cuja mistura é submetida à pressão e ao calor. A Figura 1 mostra o esquema de classificação dos painéis, baseando-se em algumas variáveis, conforme Iwaiwiri et al. (2003).

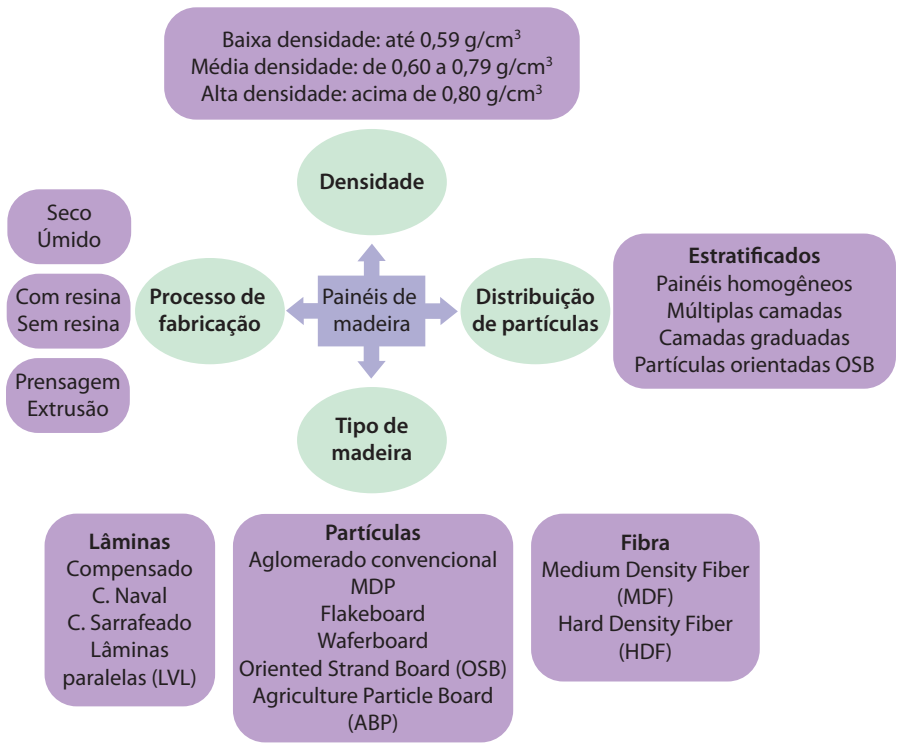


Figura 1. Classificação dos painéis de madeira. Fonte: adaptado de Iwaikiri (2003).

3. Resinas para Fabricação de Painéis

A resina é usada na fabricação dos painéis para aglutinar as partículas de madeira que compõem o painel, conferindo-lhe forma, sustentação e resistência (ZENID, 2007). Atualmente, 70% de todos os painéis fabricados no mundo levam algum tipo de resina (aglomerante) e, deste total, a grande maioria utiliza resinas sintéticas. Em relação às resinas para fabricação de painéis, a

resina à base de formaldeído em solução aquosa é utilizada frequentemente pela indústria, em razão do baixo custo. Segundo Melo (2009), 90% de todos os painéis aglomerados produzidos no mundo utilizam resinas de ureia-formaldeído (UF). A Tabela 1 apresenta as características das resinas utilizadas na fabricação de painéis de partículas.

Tabela 1. Características das resinas empregadas na fabricação de painéis de partículas.

Tipo de Resina	Aplicações
Fenol-formaldeído (resinas PF)	Fabricação de produtos que exigem algum grau durabilidade de exposição exterior, por exemplo, OSB, de contraplacado de madeira macia, e tapume. Exigem tempos de prensa mais longos e temperaturas mais altas do que as resinas de ureia-formaldeído. Os produtos que usam resinas PF (muitas vezes referidos como compostos fenólicos) podem apresentar estabilidade dimensional reduzida por causa de teores de umidade mais baixos nos produtos acabados. A cor escura inerente de resinas PF pode torná-las inadequadas para aplicações de produtos decorativos, tais como painéis e mobiliário.
Ureia-formaldeído (UF)	Fabricação de produtos em que a uniformidade dimensional e lisura de superfície são de interesse primário, por exemplo, aglomerado e MDF. As resinas são projetadas para aplicações interiores. Podem ser curadas por meio de processos em temperatura ambiente e até 150°C. A pressão e a temperatura, às vezes, podem ser moderadas em conformidade ao processo. Resinas de ureia-formaldeído são mais econômicas do que as resinas PF e são as mais amplamente utilizadas para produtos compósitos de madeira,
Melamina-formaldeído (MF)	Laminados decorativos, revestimento de papel. São geralmente mais caras do que as resinas PF.
Di-isocianato de difenilmetano (MDI)	Normalmente utilizada na fabricação de produtos compósitos de madeira; MDI é usada principalmente na produção de OSB. As instalações que usam MDI devem tomar precaução especial com medidas de segurança ao trabalhador.

Fonte. Adaptado de Youngquist (1999).

No entanto, existe a tendência mundial para o uso de produtos biodegradáveis, não poluentes e originados de fontes renováveis. O óleo de mamona ou óleo de rícino, conhecido internacionalmente como *castor oil*,

é extraído de uma planta conhecida no Brasil como mamona ou caturra. É uma planta da família das Euforbiáceas, abundantemente encontrada em regiões tropicais e subtropicais. A partir do óleo de mamona, é possível sintetizar poliois e pré-polímeros com diferentes características que, ao serem misturados, originam poliuretanas. (SILVA et al., 2013).

A resina poliuretana (PU) à base de óleo de mamona apresenta-se como uma alternativa aos adesivos à base de formaldeído utilizados na produção de painéis de madeira, prevenindo inconvenientes relacionados à origem não renovável e à emissão de poluentes. Além disso, obtém-se a redução do consumo de energia, devido a menores temperaturas durante a prensagem dos painéis (BERTOLINI et al., 2013).

4. Durabilidade de Painéis de Madeira

Conforme as normas ABNT NBR 15575 -2013 e ASTM E 632-1996, são descritos alguns conceitos relacionados com a durabilidade e o desempenho dos materiais e dos componentes construtivos. A Figura 2 apresenta um esquema com os parâmetros necessários para avaliar o desempenho global de um material ou componente, baseando-se na norma ABNT NBR 15575 -2013.

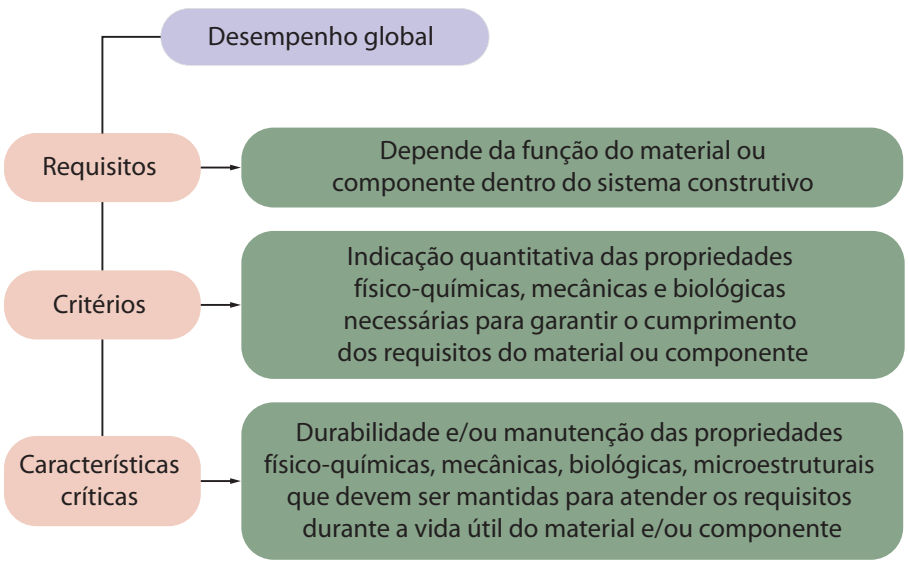


Figura 2. Esquema com os parâmetros necessários para avaliar o desempenho global de um material ou componente. Baseado na norma ABNT NBR 15575 -2013.

- **Agente de degradação:** Tudo aquilo que age sobre um sistema, contribuindo para reduzir seu desempenho.
- **Mecanismos de degradação**: São as formas como os agentes de degradação causam as mudanças (físicas ou químicas), que conduzem ao detrimento de uma ou mais propriedades pela ação dos fatores de degradação no material.
- **Degradação:** Redução do desempenho devido à atuação de um ou vários agentes de degradação.
- **Desempenho:** Comportamento em uso de uma edificação ou de seus sistemas.
- **Durabilidade:** Capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção. O termo durabilidade é comumente utilizado para expressar a condição em que a edificação ou seus sistemas mantêm seu desempenho requerido durante sua vida útil.

4.1. Agentes ou Fatores de Deterioração

Agentes de degradação são definidos como ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas, bem como seus mecanismos e os efeitos que causam em um material ou componente. Vale ressaltar a ação conjunta entre os agentes como fator importante na previsão da degradação do material. Dentre os vários agentes de degradação, a água é um dos mais importantes (JOHN, 1997). Sua ação nos diferentes estados: líquido, na forma de chuva, vapor na forma de umidade, sólido na forma de gelo pode contribuir para degradação de vários materiais aplicados na construção civil. Outros agentes de degradação importantes são a temperatura e a radiação solar (ultravioleta), que podem ocasionar transformações físicas, químicas, micro e macroestruturais. Os fatores ambientais e, notadamente, a degradação fotoquímica, podem ser designados pela palavra *weathering*. A Figura 3 apresenta, com base nas diretrizes estabelecidas pela norma ASTM E 632-82, um esquema com os principais fatores que influenciam a durabilidade de um material ou elemento construtivo.

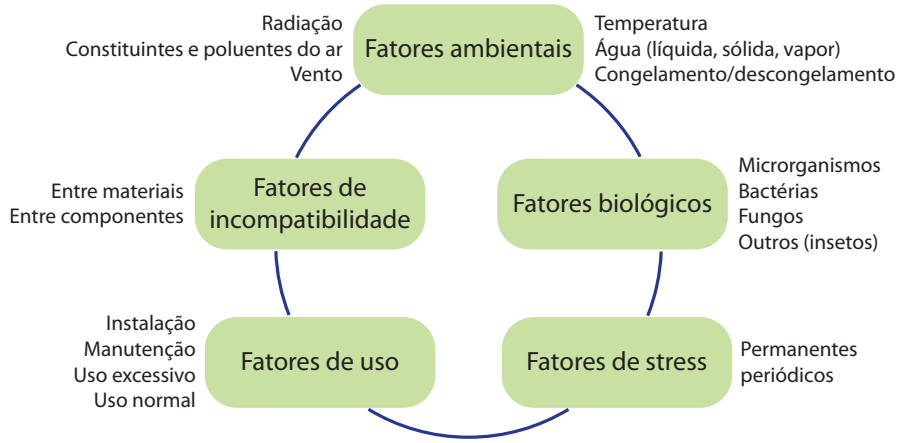


Figura 3. Fatores ou agentes de degradação que influenciam a durabilidade dos materiais. Baseado na norma ASTM E 632-96.

4.2. Mecanismos de Degradação

Os mecanismos de degradação são responsáveis pela ocorrência de mudanças nas propriedades físicas e mecânicas. Esses mecanismos podem ser definidos em vários níveis: os associados à degradação física do material, química ou biológica.

4.2.1. Mecanismos de Degradação Associados aos Fatores Ambientais

A madeira, como outras substâncias orgânicas, pode sofrer alterações no desempenho e na durabilidade por ação de fatores ambientais associados com a radiação solar, temperatura, precipitação e outras formas de ação da água como congelamento, degelo, umidade, componentes normais do ar, poluentes do ar e vento. Stark et al. (2004) e Fabiyi et al. (2008) afirmam que fatores ambientais podem gerar mudanças na cor e na aparência da madeira. Essa mudança é basicamente uma reação de superfície. A penetração da luz nas capas de madeira é inferior a 75 micrometros, quando se trata da luz UV, e equivalente a 200 micrometros, quando se trata de luz visível. Entretanto, a mudança de cor pode afetar mais profundamente a madeira, devido a reações derivadas da foto-oxidação, o que resulta visivelmente em: a) mudança na cor e perda de brilho; b) aumento da rugosidade; c) laminação,

rachaduras *e gretas; d) escamação-descamação; e) amarelamento.* A quantidade e o tipo de deterioração que um material pode apresentar dependem da sua susceptibilidade espectral, definida como a medida do dano causado por energia luminosa, o qual varia de acordo com os comprimentos de onda da luz (curta ou longa).

A água atua também como um fator degradador. Segundo Stark (2006), a água acelera a reação de *oxidação* e causa o *inchamento* da fibra de madeira. A degradação dos componentes hidrofóbicos (tal como a lignina) na superfície do compósito conduz ao aumento das quantidades de celulose (componente hidrofílico) na superfície, o que faz com que o polímero-madeira seja mais suscetível à absorção de umidade. A madeira exposta à água salgada tende a absorver essa água e, em ciclos repetidos de molhagem e secagem, as fibras de madeira próximas da superfície apresentarão maior concentração de sal nas células lumens. Essas células podem explodir se absorverem muito sal. Embora o efeito global sobre as propriedades da madeira seja mínimo, as fibras de ruptura podem acumular-se na superfície de madeira, criando uma aparência difusa.

4.2.2. Mecanismos de Degradação Associados aos Fatores Biológicos

A madeira é um material orgânico e, por essa razão, pode ser atacada e decomposta por insetos, fungos e bactérias em um processo denominado de biodeterioração, caracterizado pela colonização de insetos, fungos e bactérias nas células e tecidos, causando alterações na estrutura anatômica e propriedades químico-físico-mecânicas (BRAZOLIN, 2009). Desse modo, a degradação biológica de resíduos orgânicos pode ser entendida como resultado da ação de microrganismos que utilizam esse material como substrato para o seu crescimento e desenvolvimento. A Figura 4 ilustra os tipos de fungos que utilizam como alimento a madeira (xilófagos) e os tipos de deterioração causada por eles.

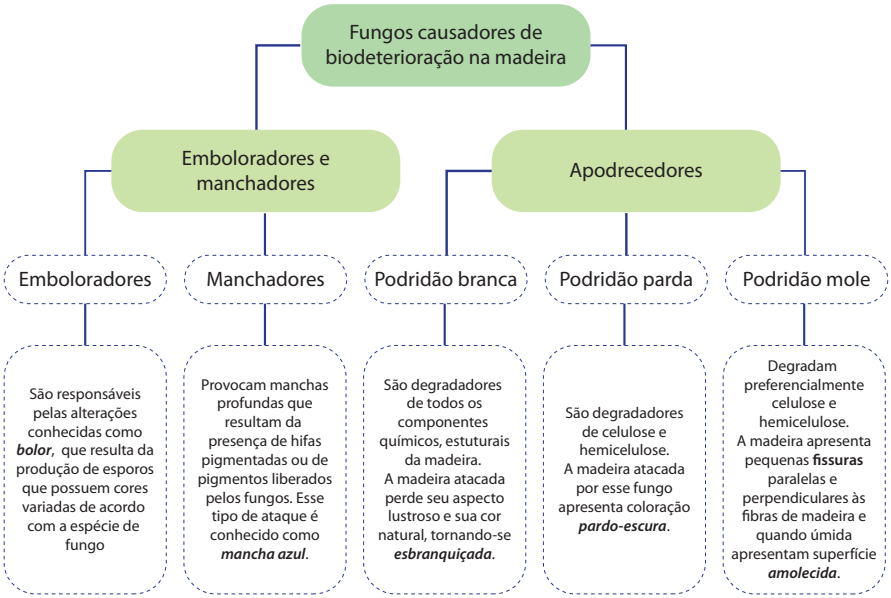


Figura 4. Fungos deterioradores da madeira. Adaptado de IPT (2001).

Os fungos que causam descoloração na madeira armazenada e em serviço são geralmente definidos como fungos manchadores, já os fungos emboloradores, que crescem na superfície da madeira, possuem hifas que podem penetrar profundamente no alburno sem afetar a coloração da madeira, (OLIVEIRA et al., 1986). Ambos os fungos, os emboloradores e os manchadores, conferem prejuízo à qualidade estética dos produtos à base de madeira, devido à descoloração. Existem várias metodologias que são amplamente usadas para determinar a resistência natural ao apodrecimento e colonização de fungos da madeira.

Fungos causadores de ***podridão branca*** ocasionam a perda progressiva de massa e das propriedades de resistência em decorrência do contínuo consumo de celulose, hemicelulose e lignina. No caso de fungos causadores de podridão parda, a madeira, uma vez seca, apresenta o aspecto de estar levemente queimada, adquirindo coloração parda, a madeira sofre colapso com facilidade e desenvolve inúmeras fissuras paralelas e perpendiculares (MORESCHI, 1995). Os fungos de ***podridão parda*** são mais eficientes na decomposição da celulose e hemicelulose. São incapazes de metabolizar anéis aromáticos ou seus produtos alifáticos. Ao atacar polissacarídeos associados à lignina, removem o grupo de CH_3 e as cadeias laterais R-O-CH_3 da lignina, deixando os fenóis

que, ao se oxidarem, tornam-se marrons ou pardos. Como é o caso dos fungos: *Poria coeus*, *Lenzites trabea e Gloeophyllum trabeum* (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). Os fungos de ***podridão mole*** são amplamente encontrados na natureza causando deterioração na madeira exposta a ambientes aquáticos e terrestres. São particularmente ativos em condições de alta umidade e pouco oxigênio, que inibe a atividade dos fungos causadores da podridão branca e da podridão parda (IPT, 2001; DANIEL et al., 1998).

4.3. Métodos de Avaliação de Durabilidade

Com o objetivo de prever a vida útil de um material ou componente construtivo, de acordo com o tipo de aplicação, devem ser definidos, previamente, as principais propriedades físico-mecânicas e os mecanismos de degradação do material submetido a ensaios de envelhecimento natural ou acelerado, assim como as metodologias usadas para a sua determinação. Os métodos de envelhecimento para avaliar a durabilidade de painéis derivados de madeira incluem testes de longo prazo e de curto prazo. Testes de longo prazo (envelhecimento natural) são os ensaios de exposição ao ar livre, para avaliar a influência das intempéries (HAYASHI et al., 2002). No entanto, as respostas do envelhecimento natural são lentas. Desse modo, busca-se aplicar ensaios de envelhecimento acelerado (curto prazo) que simulem parcialmente os de envelhecimento natural (Figura 5). Portanto, o uso dos ensaios de envelhecimento acelerado, em laboratório, tem como objetivo fornecer dados, em curto prazo, sobre a durabilidade, bem como a respeito dos fatores de degradação. Normalmente, são aplicados em paralelo aos ensaios de envelhecimento natural e os de envelhecimento acelerado para avaliar o material, pois os dados obtidos em ambos são complementares.

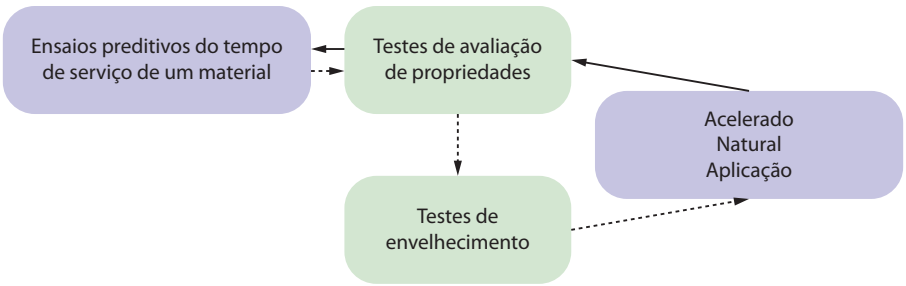


Figura 5. Ensaios de durabilidade de um material.

Segundo Crewdson (2009), o uso de algumas condições exageradas nos ensaios de envelhecimento pode levar a conclusões erradas, e muita confiança apenas em testes acelerados pode ser potencialmente enganador. Ensaios de durabilidade ao ar livre (intemperismo) devem ser utilizados para avaliar a eficiência dos ensaios acelerados. Com um procedimento de teste de envelhecimento acelerado correto, busca-se correlacionar os dados com aqueles obtidos no ensaio de envelhecimento ao ar livre. Desse modo, pode-se fazer um desenho experimental do ensaio acelerado que gere dados próximos aos ensaios de envelhecimento natural, sendo, para isso, necessário o uso de avaliações apropriadas, por meio de materiais de controle e pelo uso de análise estatística de confiança.

4.3.1. Envelhecimento Natural

A durabilidade de painéis à base de madeira ou de resíduos agroindustriais é um aspecto importante quando se planeja seu uso na construção civil, visando a determinar o desempenho ao longo prazo. No entanto, a durabilidade dos materiais em condições de exposição varia com o local de aplicação. Essa situação se apresenta, por exemplo, quando se deseja aplicar normas ou resultados obtidos em países de clima temperado, em condições climáticas tão diferentes quanto a brasileira. Exposições do material em diferentes locais, assim como durante vários anos, pode aumentar a confiabilidade dos resultados sobre a durabilidade. Considerando a estrutura peculiar e os mecanismos de degradação dos painéis particulados, é necessário proceder a uma exposição ao ar livre e avaliar com mais precisão sua durabilidade (SEKINO, 2003).

A bancada para expor corpos-de-prova ao envelhecimento natural depende do ângulo de exposição relativo à horizontal, como mostra a Figura 6. Esse ângulo pode variar dependendo das condições de uso final do material. O ângulo de 0° é pouco utilizado em painéis em estruturas planas, devido à água não escorrer. O típico ângulo na mesa de exposição usado em produtos para automóveis é de 5°. Ângulos de 25° ou 34° são usados para maximizar a radiação solar. O ângulo de 45° é usado em materiais que não têm o uso final definido e o ângulo de 90° é usado para avaliar materiais que serão submetidos à baixa temperatura, à baixa radiação solar e à baixa umidade relativa.

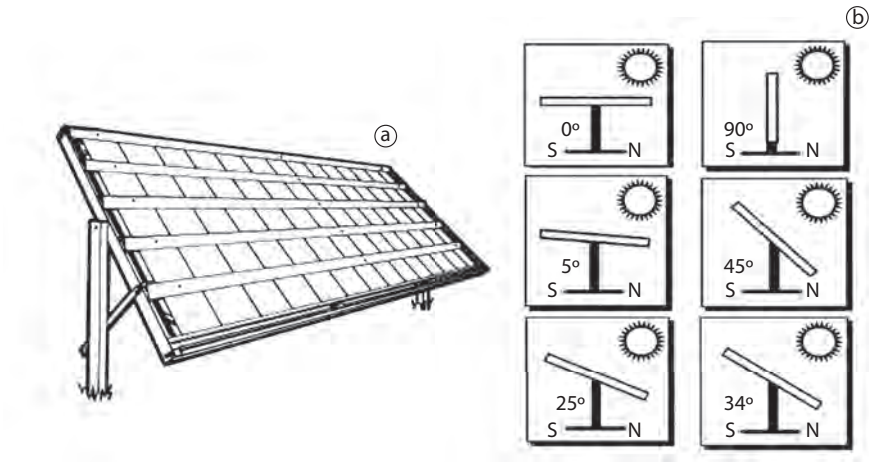


Figura 6. Envelhecimento natural a) bancada b) Ângulo de exposição de materiais ao ar livre (hemisfério sul). Fonte Q-lab (2011).

A utilização de campos de exposição natural ou de envelhecimento natural são especialmente úteis para identificar: a) perda de resistência mecânica e deterioração física do material; b) variação dimensional do material causada pela temperatura e pela umidade; c) estudos de temperatura máxima de serviços; d) Mudança de cor, desbotamento e perda de brilho; e) Rachaduras, deformação e envelhecimento pelo calor; f) Mecanismos de biodegradação.

4.3.2. Envelhecimento Acelerado

Os ensaios de envelhecimento são aqueles nos quais os materiais ou componentes construtivos são submetidos ou expostos a fatores de degradação específicos que podem ocorrer no envelhecimento natural, como a radiação ultravioleta, a umidade e a temperatura, com uma intensidade acima da expectativa de serviço. Normalmente, no envelhecimento acelerado, o material é exposto à sequência de fatores de degradação em condições controladas até completar um ciclo. No entanto, o número de ciclos nos ensaios é diferente das condições reais de degradação do material (SEKINO, 2003; GARZON et al., 2012). Entretanto, o uso de um teste de envelhecimento acelerado ajuda a estimar a durabilidade de um material ou componente por meio da comparação ao avaliar, por exemplo, as propriedades físico-mecânicas antes e após a realização do teste (KARLSSON, 1996). A Tabela 2 lista as

metodologias de envelhecimento acelerado usadas para avaliar a durabilidade de painéis particulados em laboratório.

Tabela 2. Metodologias de envelhecimento acelerado em laboratório

Método	Tipo de Exposição	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Tempo (h)
Cycle JIS-B	Imersão em água	100	NC	2
	Imersão em água	20	NC	1
	Ar quente e seco	60	NC	21
Cyclic APA D-1	Imersão em água	66	NC	8
	Ar quente e seco	82	NC	14,5
	Acondicionamento	NC	NC	1,5
V313	Imersão em água	20	NC	72
	Congelamento	(-12)	NC	24
	Ar quente e seco	70	NC	72
	Acondicionamento	NC	NC	4
ASTM D 1037 (6 ciclos)	Imersão em água	49	NC	1
	Vapor	93	NC	3
	Congelamento	(-12)	NC	20
	Ar quente e seco	99	NC	3
	Vapor	93	NC	3
	Ar quente e seco	99	NC	18
VPSD	Vácuo	NC	NC	0,5
	Imersão com pressão	NC	290	1
	Ar quente e seco	60	NC	22
EN 321-2001 (3 ciclos)	Imersão em água	20	NC	72
	Congelamento	-20		24
	Ar quente e seco	70		72
	Acondiconamento (50%UR)	25		72

NC: Nada consta ; ASTM American Society For Testing And Materials; APA Engineered Wood Association; V313 European Standard ; JIS Japanese Industrial Standards ; VPSD: Vacuum, Pressure,; Soaking and Drying. Ensaio para Melamine Faced Chipboard (MFC) ; European Committee for Standardization. European Standard. DINEN 321. Fonte: Própria autoria.

4.3.2.1. Biodeterioração por Ataque de Fungos

A quantificação da degradação gerada pelos fatores biológicos é necessária para estimar as medidas de proteção e preservação requeridas pelos materiais. Segundo Schefer (1971), a biodeterioração biológica gerada por fungos está relacionada diretamente com as condições de precipitação e temperatura. Em lugares com climas mais úmidos e quentes, os materiais de madeira e derivados são mais suscetíveis à proliferação e ao ataque de fungos do que aqueles locais com climas mais frescos e secos. Os fungos podem colonizar em qualquer substrato (material) que provê quantidade suficiente de nutrientes e água (TANACA et al., 2011).

Segundo Monteiro e Freitas (1997), dois materiais podem apresentar propriedades mecânicas semelhantes, porém, apresentar resistência natural diferente, uma vez sujeitos a ataques biológicos. Por isso, para o possível uso de materiais de madeira e seus derivados, no caso desta pesquisa, painéis particulados à base de resíduos agroindustriais, faz-se necessário avaliar sua suscetibilidade aos fatores biológicos (fungos) para determinar sua durabilidade natural.

Algumas das metodologias amplamente usadas para determinar a resistência natural ao apodrecimento e à colonização de fungos da madeira e dos elementos de preservação e conservação são apresentadas na Tabela 3. Essas metodologias determinam a perda de massa dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de biodeterioração, como medida indireta de sua resistência natural ao apodrecimento, indicando uma estimativa de resistência relativa dos materiais avaliados ao ataque de fungos que causam podridão branca e/ou parda. Para os fungos emboloradores, são analisadas as porcentagens de colonização do fungo no corpo. Os métodos de biodegradação acelerados permitem, em um tempo relativamente curto, obter resultados e orientar a escolha do uso final do produto comparado com o tempo que levaria para avaliar em um processo de biodeterioração natural de um material orgânico em condições reais de uso.

Tabela 3. Normas de avaliação da biodeterioração biológica

Fungo avaliado	Norma	Descrição	Tempo de ensaio
Fungos Apodrecedores	**ASTM D 2017/05** Método Acelerado de Laboratório resistência natural de madeiras	Chamado "SOIL BLOCK" por usar como meio de cultura o solo. Avalia a resistência à deterioração natural da madeira ou resistência de materiais orgânicos à fungos apodrecedores. Os fungos especificados pela norma são: *Gloeophyllum trabeum*, *Postia Placenta* e *Tramestes Versicolor*. A resistência do material é avaliada por meio da porcentagem da perda de massa.	16 semanas
	EN 113/ 1996 Comite Europeen de Normalization /CEN Método de ensaio para determinar a eficácia protetora contra destruidores da madeira.	Nesse ensaio os corpos-de-prova são tratados com conservante e, em seguida, são expostos ao ataque de fungos sobre um meio "AGAR BLOCK". Após um período de exposição, são calculadas as perdas de massa das amostras. Essa perda de massa é a medida de eficácia. Quanto menor for a perda de massa, mais eficaz é o conservante.	16 de semanas
Fungos emboloradores	**ASTM D 3273-2012** Método para a resistência ao crescimento de fungos emboladores sobre a superfície dos revestimentos interiores de uma câmara ambiental.	É um método utilizado para simular um ambiente severo de exposição, principalmente a alta umidade e temperatura. Esse método determina a resistência do material e permite avaliar se o(s) produto(s) usados como proteção são ou não apropriados e formulados para altas umidades e temperaturas, ao crescimento de fungos emboloradores. Após a conclusão do teste, a amostra é classificada de 0 a 10, sendo 0 equivalente à ausência de crescimento e 10 ao crescimento intenso de fungos	28 dias

Fonte: Própria autoria.

Tabela 3. Continuação.

Fungo avaliado	Norma	Descrição	Tempo de ensaio
Fungos emboloradores	**ASTM D-5590-2010** Resistência dos filmes de tintas e revestimentos relacionados com a desfiguração fúngica em quatro semanas.	Após a conclusão do teste, a amostra é classificada de 0 a 4, onde 0 equivale a ausência de crescimento e 4 ao crescimento intenso. Alguns dos fungos especificados pela norma são: *Aspergillus Níger* e *Penicillium Citrinum*.	16 días
	ASTM G21 – 15 Resistência dos materiais sintéticos poliméricos ao ataque de fungos	Nesse metodo é realizada a inoculação das amostras com fungos emboloradores. A classificação varia de 0 a 4, sendo 0 equivalente à ausência de crescimento e 4 ao crescimento intenso. Alguns dos fungos especificados pela norma são: *Aspergillus brasiliensis*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetomium globosum Trichoderma virens*, *Aureobasidium pullulans*.	28 dias
	ASTM1413 – 08 Resistência de prevervativos de madeira ao ataque de fungos	Método de ensaio que abrange a determinação da quantidade mínima de preservativos de modo a evitar a deterioração das espécies selecionadas de madeira por fungos selecionados em condições laboratoriais ideais. Alguns dos fungos especificados pela norma são: *Neolentinus lepideus*, *Gloeophyllum trabeum* ,*Postia placenta*, *Trametes versicolor*.	12 semanas
	ABNT NBR 14941:2011	Método para avaliação do desempenho de tintas para edificações não industriais –Método para determinação da resistência de películas não lixiviadas, de produtos classificados conforme ABNT NBR 11702, ao crescimento do fungo Aspegillus niger, em placa de Petri.	14 dias

Fonte: Própria autoria.

5. Fabricação de Painéis Particulados

5.1. Fabricação de Painéis de Partículas de Bagaço de Cana-de-açúcar e Resina Poliuretana à Base de Óleo de Mamona (BCP)

A fabricação dos painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar a partir do emprego de resíduos da agroindústria e resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona foi executada em condições controladas de laboratório, seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996). As características do painel e do processo de fabricação são elencadas na Tabela 4. O desempenho físico e mecânico dos painéis particulados foi analisado com base nas prescrições dos documentos normativos ABNT NBR 14810 (2006) e ANSI A208.1 (1999).

Tabela 4. Características do painel de partículas de bagaço de cana de açúcar.

Característica	Descrição
Dimensões	40 x 40 cm
Espessura	12 mm
Densidade	800 kg/m^3
Tipo de painel	Aglomerado convencional
Distribuição de partículas no painel	Homogênea
Método de prensagem	Convencional

O processo iniciou-se com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas sucroalcooleiras da região de Pirassununga – SP, Brasil. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60°C) até atingir a umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal, e o outro o isocianato polifuncional, em uma proporção de 2 partes de catalisador para 1 parte de poliol, sendo 15% da massa. A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 min. Posteriormente, as partículas foram inseridas em um molde formador de painel (50 x 50 cm) e inserida em prensa

termo-hidráulica a 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 min. O painel foi esquadrejado, retirando-se as bordas para seu acabamento final (Figura 7).



Figura 7. Fluxograma ilustrativo do processo de fabricação dos painéis particulados com bagaço de cana-de-açúcar

5.2. Painel de Madeira Comercial (MDP)

Foi adquirido um painel multicamada comercial (15 × 1830 × 2750 mm), denominado MDP (*Medium Density Particleboard*), com 15mm de espessura,

sendo confeccionado com partículas de *Eucaliptus sp* e com resina de uréia-formaldeído.

5.3. Tratamentos Lateral e Superficial dos Corpos de Prova

Os corpos-de-prova de 27 × 5 cm de BCP e MDP foram submetidos a um tratamento lateral para a selagem das bordas, com objetivo de diminuir a entrada de água por meio dessa superfície, durante os ensaios de envelhecimento natural e acelerado (Figura 8).

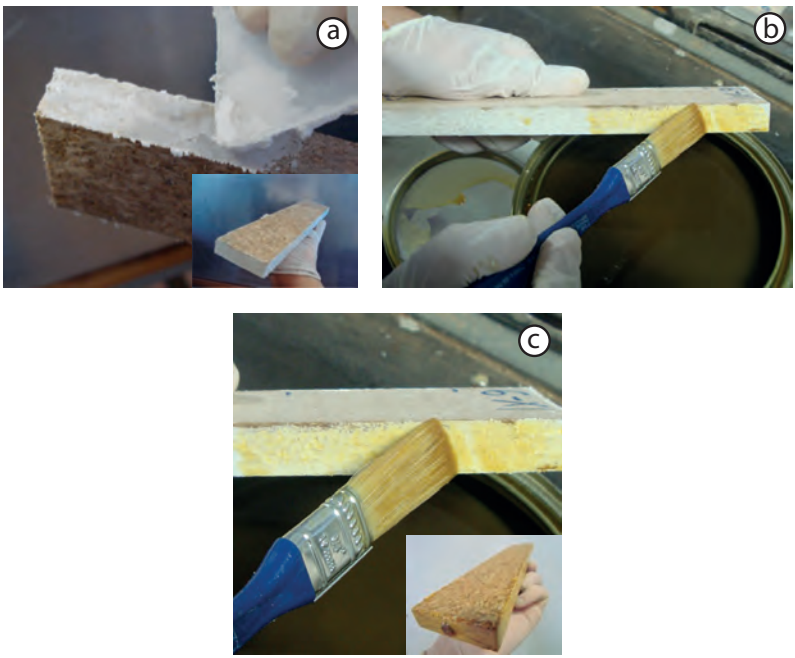


Figura 8. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) aplicação de selante nas bordas e (c) aplicação de verniz marítimo.

Para o ***tratamento superficial***, a metade dos corpos-de-prova extraídos dos painéis, tanto os elaborados com bagaço de cana-de-açúcar quanto o comercial, foram tratados superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, usado como revestimento externo. Foi misturada uma proporção de 1 parte de poliol para 1 parte do catalisador. O tratamento teve como objetivo avaliar a proteção do material contra os agentes (água, umidade e temperatura) e seus mecanismos de degradação durante a avaliação da durabilidade, feita por meio dos ensaios de envelhecimento. De igual maneira,

pretendeu-se verificar o efeito de proteção da resina de óleo de mamona como revestimento superficial. A resina foi aplicada utilizando-se uma pistola de ar comprimido. A Figura 9 indica o procedimento adotado.

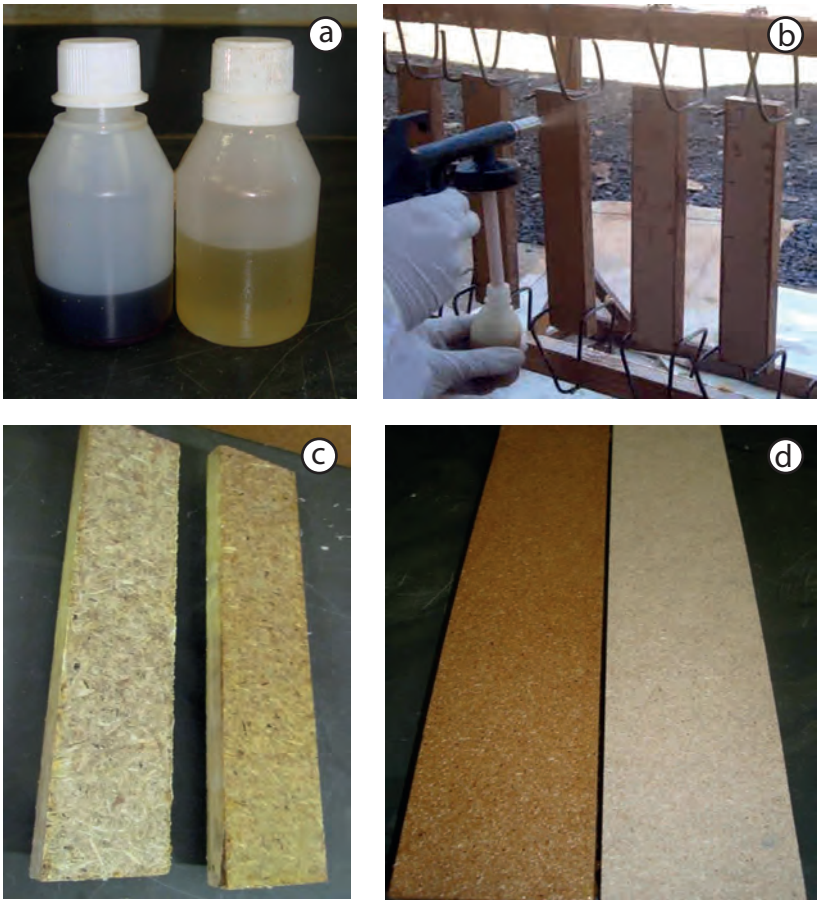


Figura 9. a) Resina poliuretana à base de óleo de mamona: catalisador (esquerda) e poliol (direita). b) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido. c) Corpos-de-prova BCP. d) Corpos-de-prova MDP.

6. Envelhecimento e Caracterização de Painéis Particulados

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado baseados na norma APA D1 e os agentes de deterioração foram analisados em duas condições: C1 - Umidade Relativa e C2 - Temperatura.

6.1. Ensaios por Ciclos de Envelhecimento Acelerado APA D1:1999

Os corpos-de-prova foram submetidos a seis ciclos de envelhecimento acelerado, tendo como variáveis a umidade relativa e a temperatura. Os equipamentos utilizados foram: (i) câmara climática, (ii) banho térmico com circulação de água, e (iii) estufa com circulação de ar (Figura 10). Antes do início dos testes, os corpos-de-prova foram armazenados por 48 ± 0,5 h à temperatura de 20 ± 5°C e umidade relativa de 65 ± 2%. A Tabela 5 apresenta as condições de exposição do ensaio de envelhecimento.

Tabela 5. Condições de exposição no ensaio APA D1:1994.

Método	Etapa	Temperatura(°C)	Tempo (h)
APA D 1 Ciclo	Imersão água	66	8
	Ar quente e seco	82	14,5
	Acondicionamento		1,5
Total			24

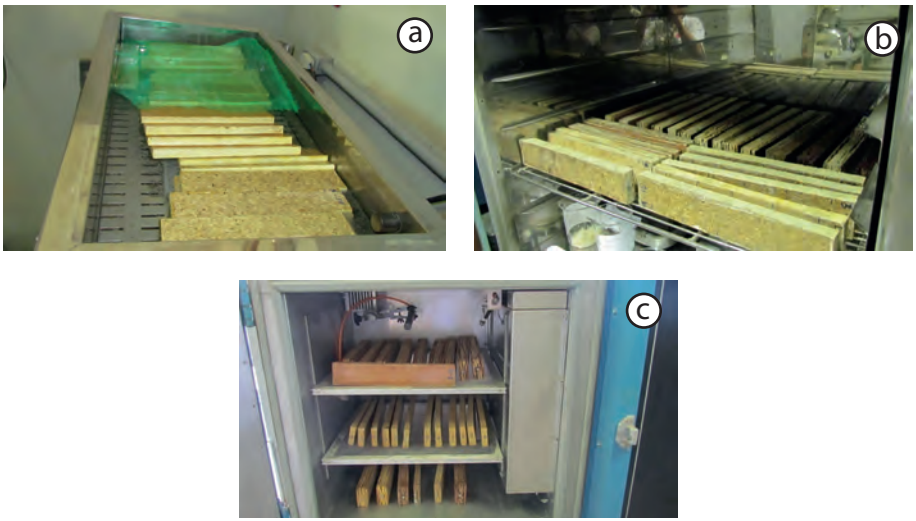


Figura 10. Etapas do ensaio APA D-1: a) Imersão, b) Ar quente e seco e c) Acondicionamento.

6.2. Exposição a Agentes Isolados de Envelhecimento Acelerado

A fim de determinar o efeito dos agentes de envelhecimento acelerado, os corpos-de-prova foram submetidos a duas exposições, conforme detalhado na Tabela 6.

Tabela 6. Condições de exposição aos agentes de degradação isolados.

Condição 1 (C1)			**Condição 2 (C2)**		
Agente de degradação	**Valor**	**Tempo (h)**	**Agente de degradação**	**Valor**	**Tempo (h)**
Umidade relativa (%)	93	8	Temperatura (°C)	82	14,5
Acondicionamento	UR = 65%	1,5	Acondicionamento	UR = 65%	1,5
	T = 20°C			T = 20°C	

6.3. Envelhecimento Natural

O ensaio de envelhecimento natural seguiu os procedimentos do documento normativo ASTM D 1435:1994 - *Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics*. Esse ensaio foi realizado na FZEA/USP, em uma bancada metálica inclinada a 31º e voltada para a face norte (latitude 21° 59´S), em Pirassununga, Brasil. Os grupos de corpos-de-prova para o ensaio de envelhecimento foram colocados no dia 25 de junho de 2012 e expostos às intempéries durante 3 e 6 meses. Radiação solar, precipitação total, temperatura e umidade relativa foram analisadas para o período de exposição total de acordo com os dados disponibilizados pela estação meteorológica da Universidade de São Paulo, localizada no campo de exposição (Figura 11). Antes da avaliação das propriedades físico-mecânicas, os corpos-de-prova foram acondicionados à umidade relativa de 50 + 20% e à temperatura de 23 + 5˚C.

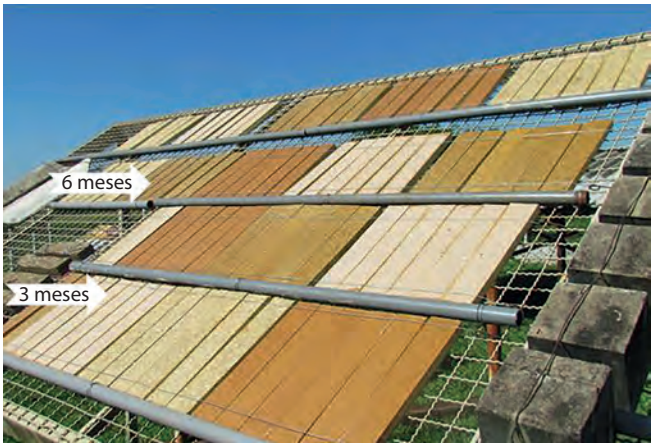


Figura 11. Bancada de exposição para envelhecimento natural Campus USP/ Pirassununga.

6.4. Caracterização Físico-mecânica

Após os ensaios de envelhecimento, foi realizada a avaliação das propriedades físico-mecânica dos painéis particulados produzidos em laboratório (BCP) e em escala industrial (MDP). As dimensões dos corpos-de-prova foram 270 × 50 mm para determinar as seguintes propriedades: Modulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Inchamento em Espessura (IE). Corpos-de-prova com 50 x 50 mm foram utilizados para determinar a adesão interna (AI) e a densidade aparente (DA). Após os ensaios de envelhecimento, os corpos-de-prova foram acondicionados a uma temperatura de (20 °C e 65% de umidade relativa), por uma semana. O equipamento utilizado os ensaios foi a máquina universal de ensaios mecânicos, modelo DL30000, marca EMIC, do Laboratório de Construções e Ambiência, do Departamento de Engenharia de Biossistemas, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga, seguindo as recomendações da NBR 14810:2006. Os valores obtidos foram comparados com aqueles estabelecidos nos ensaios pelas normas NBR 14810:2006 e ANSI A208.1 (1999).

6.5. Análise Estatística dos Resultados Experimentais

A possível heterogeneidade de variâncias nas diferentes condições de envelhecimento foi testada utilizando os Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano ou de Schwarz (BIC) utilizando o proc glimmix do SAS®,

em ajustes feitos com duas diferentes estruturas de covariâncias (VC: *variance components* e VC com *group* = Tempo) para condição de envelhecimento. Segundo esses critérios, o melhor modelo é aquele que apresenta o menor AIC (ou menor BIC).

7. Análise dos Materiais Expostos aos Ensaios de Envelhecimento Acelerado

7.1. Propriedades Físicas

Os valores de densidade aparente, após as diferentes condições de envelhecimento acelerado, apresentaram interação tripla (p -valor < 0,0434) entre os tipos de materiais (BCP, MDP), o revestimento superficial (Com e Sem), e as condições de envelhecimento acelerado (APA D1, C1 e C2). A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para a densidade aparente após o ensaio de envelhecimento acelerado (APA D1) e as duas condições de degradação C1 e C2. Ao analisar as condições em cada material nos diferentes tratamentos de revestimento superficial, pode-se observar a diferença estática para todas as situações. A densidade aparente para os corpos de prova submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado (APA D1) apresentou, no caso dos compósitos com bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana de mamona, um comportamento similar ao daqueles que foram submetidos a altas temperaturas.

Tabela 7. Valores médios de densidade aparente após ensaios de envelhecimento acelerado.

Material	Revestimento Superficial	Condição de envelhecimento acelerado								P-valor
		0 Ciclos		APA D1		C1		C2		
		Densidade Aparente (kg/m³)								
BCP	**COM**	859	A,a	791	B,a	841	A,a	822	AB,a	0,0005
BCP	**SEM**	849	A,a	715	B,b	838	A,a	780	B,b	<0,0001
P-valor		0,5676		<0,0001		0,8681		0,0098		
MDP	**COM**	639	A,a	316	B,a	637	A,a	627	A,a	<0,0001
MDP	**SEM**	618	A,a	308	B,a	616	A,a	614	A,a	<0,0001
P-valor		0,1875		0,6229		0,2043		0,4353		
Erro Padrão	11,48									

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F (P < 0,05).

No ensaio de envelhecimento acelerado APA D1, os compósitos convencionais MDP de madeira e resina de uréia-formaldeído não apresentaram diferença entre os valores de densidade aparente dos compósitos revestidos e não revestidos. Nesse caso, a resina não garantiu a preservação da densidade aparente. Isso se justifica pelo inchamento em espessura e perda de massa que os compósitos tiveram durante as condições de estresse a que foram submetidos. Segundo Gunduz et al. (2009), as propriedades químicas e físicas da madeira sofrem mudanças permanentes durante o seu aquecimento, e sua estrutura é alterada,o que se explica principalmente em razão da degradação da hemicelulose. As mudanças continuam à medida que a temperatura é incrementada durante os processos de aquecimento. Como resultado disso, a espessura, assim como a densidade, diminui devido à redução do conteúdo de umidade. Visto que as mudanças na hemicelulose modificam o desempenho da madeira, a absorção de água é reduzida e qualquer proporção de água que penetre na madeira vai ser evaporada. Esse fenômeno foi observado nos corpos de prova do BCP sem revestimento superficial para o caso da condição C2, em que a densidade reduziu 8,1% (780 kg/m^3); nesse caso, os painéis com revestimento superficial não apresentaram redução na densidade, indicando a efetividade do uso da resina poliuretana à base de óleo de mamona como revestimento superficial. Por outro lado, quando a temperatura aumenta junto com a umidade no ensaio APA D1, observa-se, em todos os materiais, a redução da densidade aparente de 7,9% (BCP-CR), 15,7% (BCP-SR). Para o caso do painel convencional, a diminuição foi de 50, 5% (MDP-CR) e 50,1% (MDP-SR), gerada possivelmente pelo aumento da espessura e perda de adesão das partículas de madeira quando exposta à água e a altas temperaturas no ensaio.

7.2. Propriedades Mecânicas

A Tabela 8 lista as análises estatísticas ANOVA avaliando o efeito do material (BCP ou MDP), do revestimento superficial e das condições de envelhecimento acelerado [referência (0 ciclos), APA, C1 e C2] sobre as propriedades mecânicas: Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Adesão Interna (AI). Além disso, são analisadas as influências das interações duplas e tripla entre o material, o revestimento superficial e as condições de envelhecimento acelerado. As análises mostram que a posição de extração dos corpos-de-prova no painel não interfere nos valores das propriedades mecânicas. No entanto, o tipo de material (BCP/

MDP), o revestimento superficial e as condições de envelhecimento acelerado (0 Ciclos, APA D1, C1 e C2) interferiram nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. Foi constatado que as interações dupla e tripla interferem significativamente sobre as propriedades mecânicas, ou seja, as variáveis não são independentes.

Tabela 8. Análise de variância para propriedades mecânicas.

Fonte de variação	MOR	MOE	AI
	P-valor	P-valor	P-valor
Material (BDP/MDP)	<0.0001**	0,1349	<.0001**
Revestimento Superficial (Com/Sem)	0.0002**	0,0002**	<.0001**
Condicão (O Ciclos, APA D1, C1, C2)	<.0001**	<.0001**	<.0001**
M x R	0,7964	0,3035	0,4049
M x C	<.0001**	<.0001**	<.0001**
R x C	0,2492	0,8328	0,0007**
M x R x C	0,5978	0,2872	0,0243*

P < 0,001 e P < 0,05 significativo a 1% (**) e 5% (*) respectivamente. M: Material; R: Revestimento superficial; C: Condições de envelhecimento acelerado.

Constatou-se que existe influência da interação tripla (material, revestimento superficial e condições de envelhecimento acelerado) sobre a adesão interna (AI) do material, ou seja, essa resposta depende da combinação entre esses fatores mencionados acima. Entretanto, o MOR e MOE são dependentes dos efeitos combinados entre os fatores: material e condições de envelhecimento acelerado. Adicionalmente, as análises estatísticas indicaram que há uma diferença significativa entre os corpos-de-prova com e sem revestimento superficial, independentemente do tipo de material e das condições de envelhecimento acelerado. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nas propriedades mecânicas para os painéis de bagaço de cana-de-açúcar e MDP nas diferentes condições de envelhecimento acelerado.

A porcentagem retida da AI, após o ensaio de envelhecimento APA D1, diminuiu para todos os corpos-de-prova, com e sem revestimento superficial. Os corpos-de-prova de MDP, após o envelhecimento acelerado APA D1, sofreram uma significativa degradação em relação aos de BCP com base no comportamento das propriedades mecânicas: MOR e MOE. O material de referência MDP apresenta, antes do envelhecimento acelerado, um menor valor de AI em relação ao BCP. O material MDP é constituído de três camadas

de partículas com tamanhos diferentes, sendo a camada interna constituída de partículas mais grosseiras e as camadas externas de partículas mais finas. Desse modo, não há completa aderência entre as partículas nas interfaces das camadas, ou seja, existe uma maior porosidade nas interfaces.

Tabela 9. Propriedades mecânicas dos painéis particulados antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Material	Revestimento Superficial	Referência (0 Ciclos)	APA D1		C1		C2	
		AI (MPa)	AI (MPa)	AI Retido (%)	AI (MPa)	AI Retido (%)	AI (MPa)	AI Retido (%)
BCP	COM	0,95	0,67	71	0,88	93	0,76	80
BCP	SEM	1,02	0,47	46	0,97	95	0,52	51
MDP	COM	0,60	0,02	4	0,56	92	0,54	89
MDP	SEM	0,52	0,00	0	0,46	88	0,40	77
Erro padrão		0,044						

Material	Revestimento Superficial	MOE (GPa)	MOE (GPa)	MOE Retido (%)	MOE (GPa)	MOE Retido (%)	MOE (GPa)	MOE Retido (%)
BCP	COM	2,15	1,57	73	2,28	100	2,15	100
BCP	SEM	2,07	1,22	59	1,97	95	1,90	92
MDP	COM	2,73	33,3	1	2,65	97	2,83	100
MDP	SEM	2,52	49,0	2	2,54	100	2,56	100
Erro padrão		0,069						

Material	Revestimento Superficial	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR Retido (%)	MOR (MPa)	MOR Retido (%)	MOR (MPa)	MOR Retido (%)
BCP	COM	21,7	20,0	90	20,2	93	21,7	100
BCP	SEM	17,9	16,8	94	17,9	100	17,9	100
MDP	COM	20,7	0,4	2	18,3	89	20,7	100
MDP	SEM	15,6	0,5	3	15,9	100	15,6	100
Erro padrão		0,82						

Como consequência, o MDP apresenta uma maior absorção de água, como indica a Figura 12. O aumento do inchamento na espessura do MDP corrobora com aumento da absorção de água e promove uma diminuição da resistência da adesão interna de partículas, como ilustra a Figura 12b. Isso pode ser explicado pelo uso da resina à base de uréia-formaldeído (UF) nos painéis comercias MDP, que apresenta baixa resistência à umidade (VALARELLI et al., 2013; IWAKIRI 2005). A diferença da resina poliuretana à base de óleo de mamona é que ela apresenta, entre outras vantagens ambientais e técnicas, maiores resistências físicas e mecânicas, principalmente resistência à umidade (SILVA et al., 2013).

Os corpos de prova com e sem revestimento superficial foram testados nas condições de envelhecimento acelerado C1 (efeito da umidade relativa de 93% por 8 h) e C2 (efeito da temperatura de 82°C por 14,5 h). Observou-se que, na condição C1, o valor retido da AI, MOR, e MOE foi acima de 85%, 95% e 89%, respectivamente, para todos os materiais, ou seja, a alta umidade relativa por 8 h não foi suficiente para comprometer o desempenho mecânico do compósito. No entanto, na condição C2, o compósito BCP sem revestimento superficial sofreu maior degradação ao observar a resistência da adesão interna, em relação ao compósito ou ao outro material MDP com proteção. Observou-se que, na condição com umidade relativa de 93% por 8 h (UR93) e com temperatura a 82°C por 14,5 h (T82), o valor retido para da MOE foi acima de 90% e 95%, respectivamente, para ambos os materiais, nas duas condições de revestimento. Isso significa que as condições de alta umidade relativa por 8 h e alta temperatura durante 14 h, avaliadas separadamente, não foram suficientes para comprometer o desempenho mecânico do compósitos e os danos ocasionados são gerados pelos efeitos combinados dos agentes de degradação.

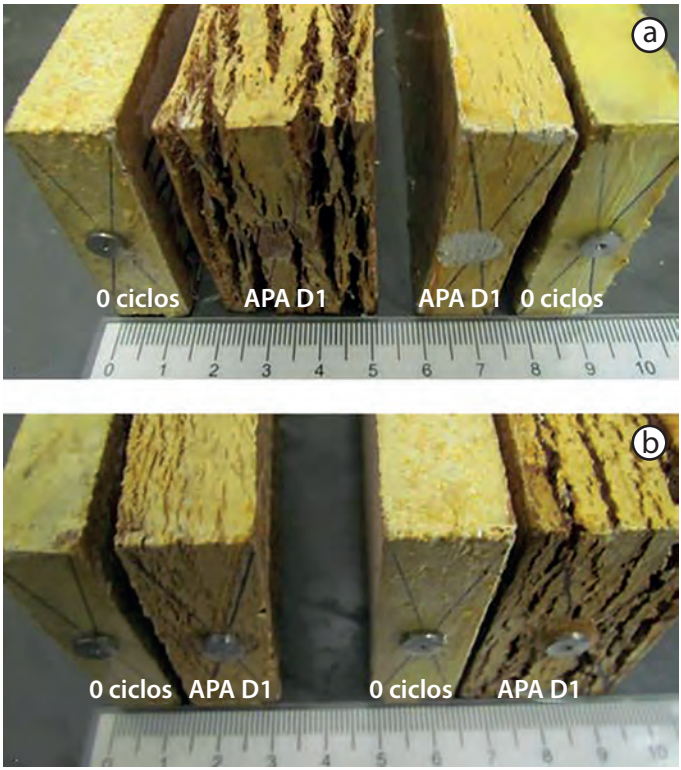


Figura 12. Corpos-de-prova de MDP e BCP sem (a) e com (b) revestimento superficial.

Kojima et al. (2010) realizaram o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 com painéis particulados de madeira com resina à base de fenol-formaldeído (PF) e de isocianato (MDI) e determinaram, respectivamente, valores retidos de AI de 27% e acima de 70%. Esses resultados indicam o efeito da resina sobre as propriedades mecânicas após o envelhecimento acelerado. A Figura 13 apresenta os painéis de bagaço de cana-de-açúcar após o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1. Podem-se observar, na Figura 13a, painéis sem envelhecimento em que a estrutura inicial e disposição das partículas de bagaço de cana-de-açúcar estão recobertos por resina. Na Figura 13b, pode-se observar que os painéis de bagaço de cana com revestimento, após o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1, apresentaram pouca degradação e a adesão interna das partículas ainda foi visível. A Figura 13b mostra um incremento nos espaços entre as partículas e, por consequência, a diminuição da ligação interna entre elas devido aos agentes de degradação, como a água, a

umidade e a temperatura, aos quais os corpos de prova estiveram submetidos. Os compósitos que receberam revestimento superficial apresentaram uma porcentagem menor de absorção de água e de inchamento de espessura em relação aos compósitos sem revestimento.

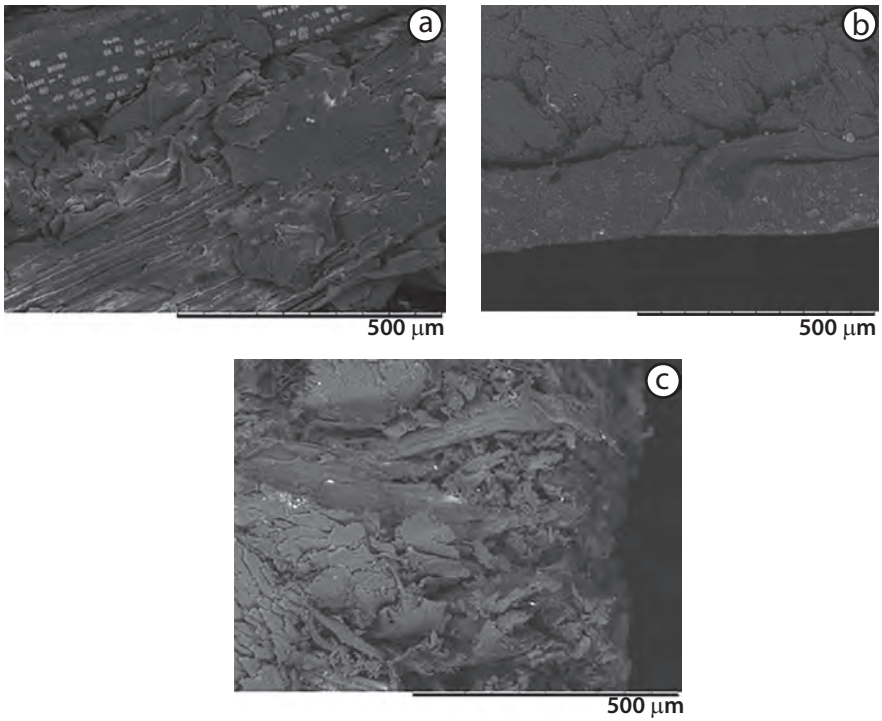


Figura 13. Imagens MEV de Painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) a) Inicial, b) BCP Com Revestimento e c) BCP Sem Revestimento após ensaios de envelhecimento acelerado APA D1.

Assim, para o caso dos painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP), a fonte de variação associada ao uso do revestimento superficial influencia de forma direta o desempenho e a durabilidade do material.

7.3. Envelhecimento Natural

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para os períodos de 3 e 6 meses de envelhecimento natural dos corpos-de-prova de painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) e de madeira (MDP) .

7.3.1. Propriedades Físicas

7.3.1.1. Densidade Aparente

Os resultados dos efeitos das condições ambientais de temperatura, umidade relativa e precipitação sobre a densidade nos painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) e painéis comerciais particulados de mediana densidade de madeira (MDP) apresentaram interação entre os tipos de materiais (BCP, MDP), o revestimento superficial (Com e Sem) e o tempo de exposição natural (0, 3 e 6 meses) com nível de significância P-valor < 0,0001.

Ao se avaliar o efeito do revestimento superficial, observa-se que os valores de densidade aparente mostraram diferença significativa em ambos os materiais, com revestimento superficial (Figura 14a) e sem revestimento (Figura 14b), em cada um dos tempos de exposição ao envelhecimento natural avaliados. Portanto, a resina poliuretana à base de óleo de mamona utilizada como revestimento superficial, além de conferir resistência nas propriedades mecânicas, melhora o comportamento dos materiais em condições ambientais adversas, principalmente a umidade (SILVA et al., 2008) (Figura 14).

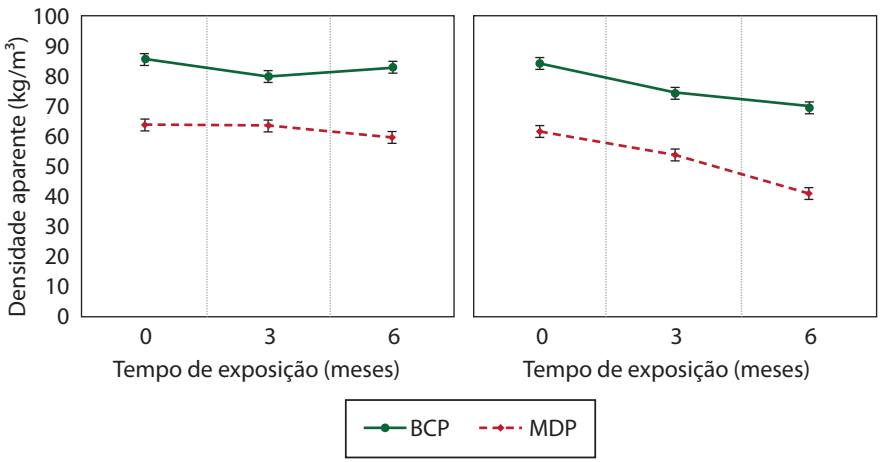


Figura 14. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural na densidade aparente (kg/m^3) dos materiais: a) com revestimento b) sem revestimento

Segundo Kojima & Suzuki (2011), as condições ambientais que podem afetar a deterioração dos painéis à base de madeira são temperatura,

precipitação, radiação solar e vento, dentre outras. Para o caso deste estudo, o tempo de análise correspondeu aos meses entre julho e dezembro, correspondendo à parte final da estação de inverno, primavera e começo do verão. Durante os três primeiros meses, foi apresentada uma precipitação de 120 mL, que, no período seguinte, aumentou para 757 mL. Após os três primeiros meses, observou-se a diminuição nos valores da densidade em ambos os materiais. No entanto, para aqueles com revestimento superficial, a densidade foi mantida sem apresentar diferença estatística durante o período de exposição. Analisando o efeito das condições ambientais em cada um dos materiais, notou-se que tanto os painéis BCP como os MDP mantiveram a densidade ao longo dos 6 meses de exposição, embora os materiais sem revestimento apresentassem uma diminuição. No caso dos painéis BCP sem revestimento, a diminuição da densidade foi observada a partir dos três meses, e essa densidade foi mantida até os 6 meses. Para o caso dos painéis MDP sem revestimento, o decrescimento da densidade foi observado desde os três meses. Esse resultado pode ser explicado pelo aumento do inchamento e perda de massa. Menezzi et al. (2008), após 8 meses de exposição, observaram que os fatores ambientais tiveram um efeito negativo nas propriedades físicas e mecânicas, atribuindo esse fato ao aumento do inchamento causado pelas mudanças nas condições ambientais a que foram expostos os materiais.

Tabela 10. Desdobramento Material * Revestimento * Tempo de exposição natural para densidade aparente (%).

Material	**Revestimento Superficial**	**Tempo de exposição ao envelhecimento natural (meses)**						
		0		**3**		**6**		**P -valor**
		Densidade Aparente (kg/m³)						
BCP	**COM**	859	A,a	802	B,a	831	AB,a	0,015
BCP	**SEM**	849	A,a	749	B,b	704	B,b	<0,0001
P-valor		0,6265		0,0057		<.0001		
MDP	**COM**	639	A,a	636	A,a	598	A,a	0,0603
MDP	**SEM**	618	A,a	544	B,b	412	C,b	<0,0001
P-valor		0,2616		<0,0001		<0,0001		
Erro Padrão	13,4726							

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey (P < 0,05)
Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste F (P < 0,05).

7.3.1.2. Absorção de Água (AA) e Inchamento na Espessura (IE) Residual

Após 3 e 6 meses de exposição dos corpos-de-prova ao envelhecimento natural, foi determinada a porcentagem de absorção de água e de inchamento residual nos materiais. A Figura 15a apresenta os resultados de absorção de água e inchamento de espessura residual, após o envelhecimento natural, assim como a influência de alguns parâmetros metereológicos em função do tempo exposição. Após os três primeiros meses (julho a setembro de 2012), os materiais submetidos a condições naturais, a variações de temperaturas, a períodos de chuvas e ao aumento progressivo da umidade relativa tiveram o aumento do inchamento na espessura e a delaminação favorecida, diminuindo a resistência de adesão interna das partículas e, por conseguinte, outras propriedades mecânicas. Entre outubro a dezembro de 2012, os parâmetros climatológicos indicaram aumento da precipitação de chuva e da temperatura.

A absorção de água variou significativamente em função da precipitação, principalmente para os corpos de prova sem revestimento superficial, independentemente do material. A taxa de absorção de água aumenta de acordo com a quantidade de madeira e/ou fibras no compósito particulado. Ou seja, quando o conteúdo de partículas de madeira é aumentado no composto, o número de grupos livres OH da celulose da madeira e/ou fibras aumenta. Com isso, observa-se um ganho de peso dos compostos ao entrarem em contato com a água, pela formação de pontes de hidrogênio. Naturalmente, o compósito com menor conteúdo de partículas de madeira e/ou fibras atinge o equilíbrio de massa mais rapidamente. Nos materiais expostos neste estudo, o conteúdo de materiais celulósicos foi de 56,2% para os corpos-de-prova de BCP e de 51,7% para os de MDP. Além dessa diferença, outros fatores podem influenciar os resultados de absorção de água, tais como, tipo de resina e revestimento superficial, porosidade interna do material e morfologia das partículas (BOND, 2006).

A Figura 15b mostra a variação do inchamento na espessura dos corpos de prova BCP e MDP, com e sem revestimento superficial, no período de exposição ao ar livre. Pode-se observar o aumento de inchamento na espessura em todos os materiais expostos. Nos corpos-de-prova com revestimento superficial (BCP CR) e (MDP CR), o inchamento na espessura aumentou em até 15% e nos sem revestimento (BCP SR) e (MDP SR), acima de 20%. Esse resultado pode ser atribuído ao período de chuva apresentado durante os

três últimos meses, como é mostrado na Figura 15d, assim como o aumento da umidade relativa gerando a degradação do material. Okuda e Sato (2008), estudaram painéis tipo *binderless* confeccionados a 180°C, expostos ao ar livre, em maio de 2004, em Tokyo, Japão (35° 42' 59.0" N, 139° 45' 40.6" E), durante 23 meses, e encontraram valores de inchamento na espessura abaixo de 10% durante os três primeiros meses, com um índice pluviométrico de 285 mm, nesse período. No caso de Pirassununga SP, Brasil, esse índice foi de 572 mm, o que possibilitou o aumento do inchamento nos materiais expostos.

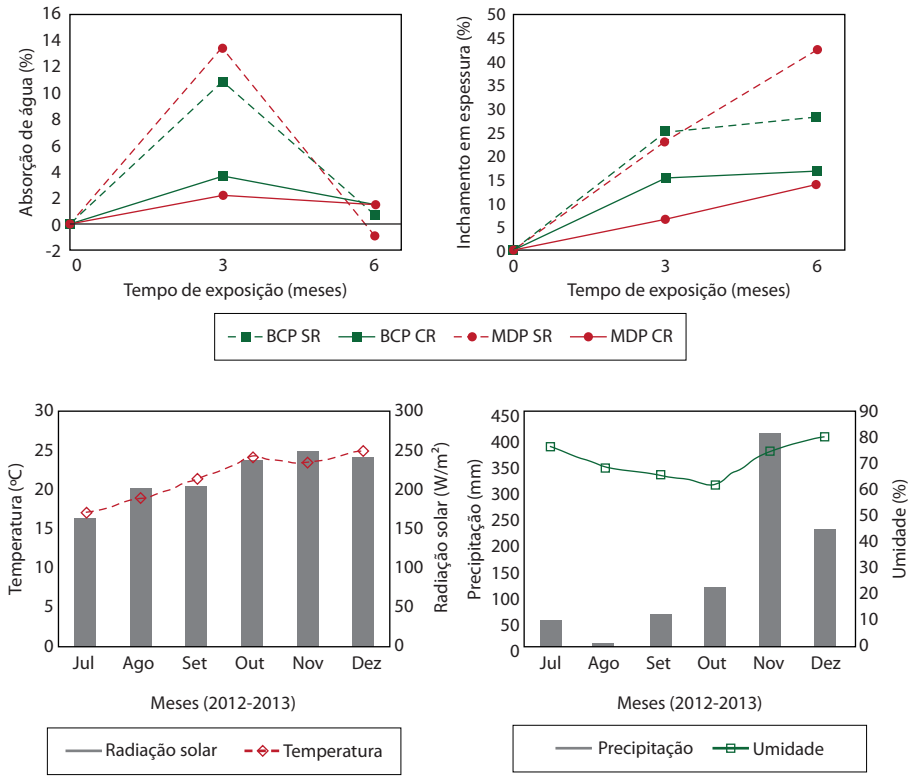


Figura 15. (a) Gráficos de absorção de água e (b) de inchamento na espessura em função do tempo de exposição. Gráficos de parâmetros meteorológicos (c) Radiação solar e temperatura e (d) precipitação e umidade relativa em função do tempo de exposição dos materiais.

Com o aumento precipitação após os três primeiros meses, o aumento da temperatura e da umidade, foi identificado um aumento na delaminação dos materiais, incrementando, da mesma forma, o inchamento. Foi observada

delaminação na borda dos corpos de prova depois de 3 meses de exposição ao ar livre, em maior proporção nos corpos-de-prova sem revestimento superficial. O mesmo ocorreu com materiais após 6 meses de exposição. No entanto, observam-se diferenças significativas entre os corpos-de-prova sem revestimento, MDP SR e BCP SR, que apresentaram valores de inchamento de 43% e 29% respectivamente. A mesma tendência ocorreu para os materiais com revestimento superficial, ou seja, o material MDP CR apresentou maior inchamento na espessura em comparação aos materiais BCP CR. De forma geral, os corpos-de-prova de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram melhor desempenho físico em relação ao MDP. Esses resultados serão posteriormente reavaliados, após um ano de exposição na estação de envelhecimento natural.

7.3.2. Propriedades Mecânicas MOR, MOE e AI

Para as três propriedades mecânicas, foram encontradas interações significativas entre: tipo de material (BDP/MDP), revestimento superficial (Com/Sem) e o tempo de exposição ao ar livre (3 e 6 meses) em relação aos corpos-de-prova controle (referência) com p-valor 0,0015 (MOR), <0,0001** (MOE) e 0,0053** (AI) . Esse resultado mostra que as fontes de variação analisadas não atuam independentemente.

Os resultados sugerem que as condições climáticas a que foram submetidos os materiais influenciaram na adesão interna (AI). Observa-se que a AI retida dos corpos-de-prova submetidos à exposição natural diminuiu em função do tempo. Menezzi et al. (2008) avaliaram painéis estruturais OSB durante 8 meses, em Brasília (Brasil), e atribuem esse comportamento ao estresse gerado durante a exposição, isto é, o encolhimento e inchaço do material e a quebra da ligação do adesivo, o qual diminui significativamente a adesão interna. Com base nas considerações da análise estatística, nota-se que há uma diferença significativa entre os tipos de materiais e o fato de haver ou não a presença do revestimento superficial. Desse modo, após o período de três meses de exposição natural, os painéis com revestimento superficial (BCP CR) apresentaram resistência de adesão interna retida acima de 62% em comparação com o índice de 50% dos painéis de partículas de madeira nas mesmas condições (MDP CR). Os painéis de bagaço de cana- de-açúcar sem revestimento superficial (BCP SR) apresentaram AI retida de 36% e os de madeira sem revestimento (MDP SR) apresentaram o valor de 13%. Essa diferença pode ser atribuída ao tipo de resina usada para aglomerar as

partículas e/ou fibras. Após seis meses, os painéis de bagaço de cana-de-açúcar, com e sem revestimento, apresentaram melhor desempenho com relação à AI retida em comparação ao material MDP.

A Figura 16 mostra a variação dos valores das propriedades mecânicas dos materiais, com e sem revestimento superficial, após o envelhecimento natural de 3 e 6 meses.

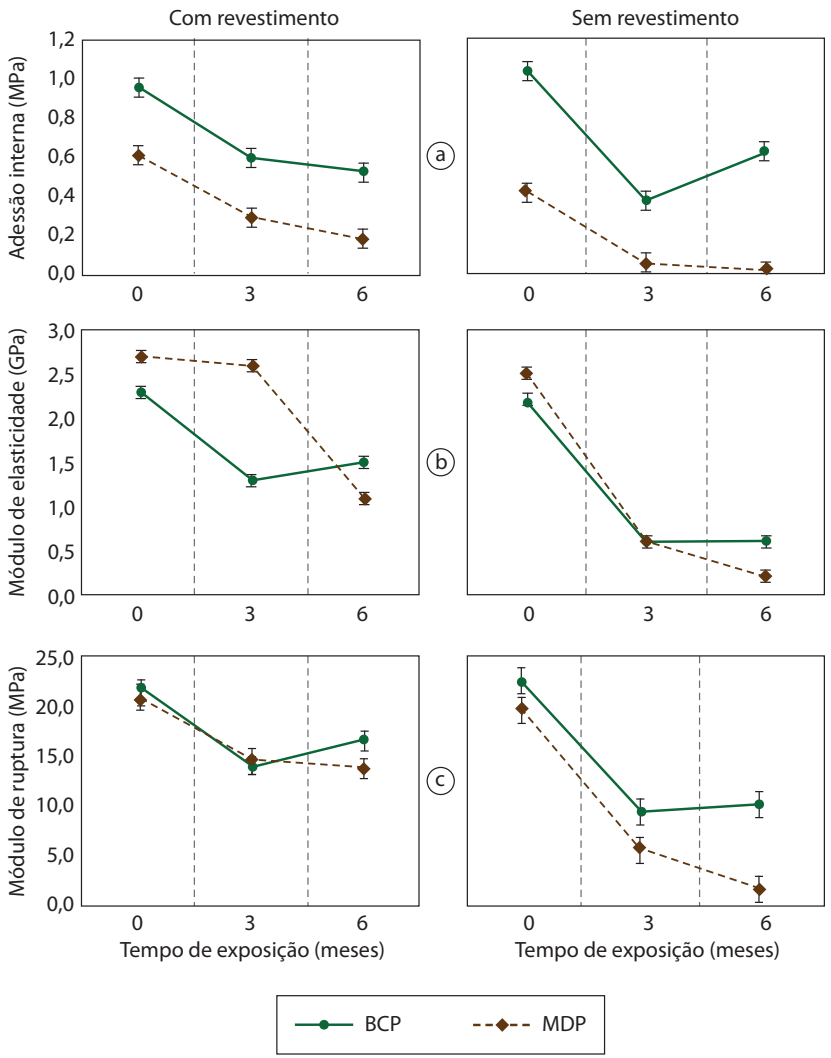


Figura 16. Efeito do revestimento superficial e do tempo de exposição ao envelhecimento natural nas propriedades mecânicas dos materiais: (a) AI, (b) MOE e (c) MOR.

O comportamento mecânico dos materiais é similar ao comportamento de outros tipos de materiais particulados. Kojima et al. (2012) estudaram painéis particulados (*Particle board* - PB), *Oriented Strands Board* (OSB), *PlyWood* (PW) e *Medium Density Fiber*board (MDF) submetidos a 7 anos de exposição ao ar livre, em oito locais do norte e sul do Japão, entre abril de 2004 e março do 2011. Os pesquisadores constataram que a resistência de adesão interna depende do tipo de material, do revestimento superficial e do tempo de exposição ao ar livre.

O efeito do intemperismo por meio da radiação solar, temperatura e precipitação ocasionaram na superfície dos materiais revestidos com a resina poliuretana à base de óleo de mamona cavidades que permitiram o ingresso de água nos materiais, diminuindo os valores das propriedades. Okuda e Sato (2008) assinalam que a degradação superficial pode ocorrer principalmente devido aos efeitos combinados da luz ultravioleta e da precipitação e que esta pode ter uma influência na redução da adesão interna das partículas no material.

Após 6 meses, os painéis de bagaço de cana-de-açúcar, com e sem revestimento, apresentaram um melhor desempenho com relação à AI retida em comparação ao material MDP. Isso pode ser explicado pela ação de expansão da resina poliuretana de óleo de mamona que, como foi dito anteriormente, ocupa os poros entre as partículas.

Observou-se uma inversão do desempenho em relação ao tipo de material com revestimento superficial. Para o caso dos materiais sem revestimento, os materiais BCP SR conseguiram manter MOE retido em 41%, enquanto os materiais MDP SR apresentaram o valor de 7%, Tabela 11.

Segundo Liso et al. (2006), o desempenho do revestimento superficial na madeira depende da qualidade da madeira, do revestimento, dos detalhes de construção e dos impactos climáticos aos quais estão expostos. Nos painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar com revestimento (BCPCR), após os três primeiros meses, aparecem cavidades ocasionadas pelo rompimento da resina superficial, devido à ação da temperatura e radicação solar na resina, assim mesmo, pode ser observado o aparecimento inicial de alguns fungos emboloradores. Segundo Scheffer (1973), dentro das primeiras manifestações visíveis de deterioração por fungos, encontram-se uma superfície suave, falta de brilho e aparecimento de manchas apresentando uma descoloração irregularmente distribuída.

Tabela 11. Valores médios e os retidos das propriedades mecânicas para painéis particulados sob envelhecimento natural.

Material	**Revestimento Superficial**	**Referência (0 meses)**	**3 meses**		**6 meses**	
		AI (MPa)	**AI (MPa)**	**AI Retida (%)**	**AI (MPa)**	**AI Retida (%)**
BCP	**COM**	0,95	0,59	62	0,53	55
BCP	**SEM**	1,02	0,37	36	0,62	61
MDP	**COM**	0,60	0,30	49	0,19	31
MDP	**SEM**	0,52	0,07	13	0,03	6
Erro padrão		0,0455				

Material	**Revestimento Superficial**	MOE (GPa)	MOE (GPa)	MOE Retido (%)	MOE (GPa)	MOE Retido (%)
BCP	**COM**	2,1	1,3	60	1,5	71
BCP	**SEM**	2,1	0,6	30	0,5	27
MDP	**COM**	2,7	2,6	97	1,1	41
MDP	**SEM**	2,5	0,6	24	0,2	7
Erro padrão		0,06				

Material	**Revestimento Superficial**	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR Retido (%)	MOR (MPa)	MOR Retido (%)
BCP	**COM**	21,7	13,9	64	16,5	76
BCP	**SEM**	17,9	7,5	42	8,0	45
MDP	**COM**	20,7	14,6	71	13,7	67
MDP	**SEM**	15,6	4,5	29	1,4	9
Erro padrão		0,971				

8. Considerações Finais

- No ensaio de envelhecimento acelerado baseado na norma APA D1 e para o caso dos painéis de MDP, o resultado mostra o sucesso parcial da proteção superficial no material particulado.
- O método de envelhecimento APA D1 mostrou-se como o ensaio que mais permitiu identificar os mecanismos de deterioração gerados pela temperatura e umidade a que foram submetidos os materiais. Os resul-

tados obtidos indicam os painéis de bagaço de cana BCP com melhor desempenho em relação aos painéis comerciais de madeira. Além disso, o revestimento superficial melhorou ainda as propriedades dos painéis. Por outro lado, o revestimento superficial não se mostrou totalmente efetivo na proteção dos painéis MDP de madeira, uma vez que fatores como a água e a umidade penetraram pelas bordas do material, o efeito do adesivo à base de ureia formaldeído não conseguiu manter as propriedades físico-mecânicas iniciais.

- Os efeitos da temperatura e a umidade são de grande importância na análise da durabilidade dos materiais. Entretanto, a análise realizada nos compósitos, mediante uma exposição separada dos fatores de degradação, de acordo com ensaio de envelhecimento (UR93) e (T82), não indicou causas explícitas da degradação em curto tempo de exposição. Assim como os resultados encontrados pelos demais ensaios, em que os efeitos desses fatores são combinados.

- A relação existente entre os materiais de construção , as estruturas e o clima são complexas e faz-se necessário encontrar métodos mais precisos para avaliar o desempenho.

- Durante a exposição natural dos corpos foi evidenciada a influência do uso da resina poliuretana à base de óleo de mamona como revestimento superficial para ambos os materiais, na propriedade de densidade aparente. Assim, pode-se recomendar a utilização da resina como revestimento superficial, tendo em conta os agentes externos extremos de degradação (radiação solar, temperatura, precipitação e vento, por exemplo) a que foram submetidos os corpos-de-prova.

- Os efeitos gerados pelos agentes de degradação, como a água, a umidade relativa e a temperatura do ar, refletiram no aumento do inchamento e na absorção de água dos compósitos sem revestimento, pelo que se recomenda o uso de um revestimento superficial.

- Dentre as metodologias de envelhecimento acelerado utilizadas, o ensaio APA D1 representa, da melhor forma, a degradação dos materiais estabelecida pelos dois agentes de degradação colocados de forma conjunta. As condições isoladas C1 e C2 determinaram valores de retenção das propriedades mecânicas acima de 77%, à exceção da AI para o BCP

SR, que apresentou um comportamento similar ao ensaio de envelhecimento acelerado APA D1.

- Foi observada a diminuição do desempenho dos materiais, uma vez submetidos às condições de envelhecimento acelerado e natural, evidenciando que os mecanismos de transferência de umidade da madeira são altamente influenciados pelas condições climáticas, que afetam as propriedades físicas e mecânicas em ambos os materiais.

- Em termos de retenção de MOR, MOE e AI, os painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram maior porcentagem após o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 e o revestimento superficial protegeu parcialmente o material, ou seja, o tipo de resina utilizado na adesão das partículas foi preponderante para garantir a preservação parcial da resistência da adesão interna do material. Nesse caso, a resina à base de óleo de mamona foi mais eficaz do que ureia formaldeído ao se obervar o desempenho do material BCP, sem e com revestimento superficial.

- O revestimento superficial realizado com a resina de mamona protegeu os painéis convencionais MDP sob as condições de agentes isolados de degradação C1 e C2, permitindo valores de retenção das propriedades mecânicas de MOR e MOE acima de 89%. Conclui-se, dessa maneira, que a degradação no material é gerada pela ação conjunta de vários agentes.

- Em ambos os materiais, o BCP apresentou melhor rigidez após o tempo de exposição, considerando o valor de MOE, devido principalmente à ação da resina poliuretana à base de óleo de mamona, utilizada como adesivo das partículas. Os materiais com revestimento superficial apresentaram melhor desempenho físico-mecânico.

- Os resultados sugerem que as condições climáticas a que foram submetidas os materiais influenciaram o desempenho mecânico dos corpos-de-prova, sendo que aqueles que não foram revestidos apresentaram porcentagem de retenção menor do que os corpos-de-prova revestidos. No entanto, o painel de bagaço de cana apresentou melhoria no desempenho após 6 meses.

- Em ambos os materiais MDP e BCP sem revestimento superficial, o BCP apresentou um melhor comportamento mecânico, após o tempo de exposição, para MOR, MOE e AI. Fato que pode derivar da ação da resina poliuretana de óleo de mamona utilizada como adesivo nos painéis de bagaço de cana-de-açúcar em comparação com a resina de ureia formaldeído.

- Pesquisas de campo com maiores tempos de exposição ao intemperismo natural e ensaios laboratoriais são necessários para melhorar a confiabilidade dos índices climáticos, incluindo medidas de taxas de decaimento em diferentes condições climáticas e diferentes tipos de madeira ou outro material particulado.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E632-82 (1996), Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials (Withdrawn 2005), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1435 - Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, Philadelphia, 5 p. 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 632 - Developed accelerated test t aid prediction of the service life of building components and materials, Philadelphia, p. 102 - 107, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1037 - Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1996. p. 137-166.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2017-05 Accelerated Laboratory test of natural decay resistence of woods. Pennsylvania p. 1-5.2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-2017-2005 Accelerated laboratory test of natural decay resistence of woods. Philadelphia, 2005. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-5590 Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3273-12 Resistence to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Pennsylvania p. 1-8. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3273-12 - Resistence to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Pennsylvania, 2012. p. 1-8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-5590 Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay.

AMERICAN SOCIET FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G21-15 - Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi. Philadelphia, 2015. 6 p.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI A208.1 (1999). Mat-formed wood particleboard: Specification. National Particleboard Association. Gaithersburg.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 14810* - Chapas de madeira aglomerada - parte 3: Métodos de Ensaio, terminologia. Rio de Janeiro, 1999, 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 15575/2013* - Norma de Desempenho" - Edificações Habitacionais.Rio de Janeiro, 2013.

BATTISTELLE, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. *Revista Minerva*, v 5, n.3, p.297-305, 2009.

BERTOLINI, S.M. et al..Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas. Capítulo 2. Painéis de Partícula de Madeira e de materiais lignocelulósicos / São Carlos: EESC/USP, 2013, 339 p. ISBN 9788580230192 2013.

BOND, D.A.; SMITH, P. A. Modelling the transport of low-molecular-weight penetrants within polymer matrix composites. *Applied Mechanics Reviews*, v. 59, p. 249–267, 2006.

BRAZOLIN,S. *Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP*. 2009. 266f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

BRITO, E.O.et al. Propriedades de chapas produzidas com resíduos do fruto de coco e partículas de pinus. *Revista Floresta e Ambiente*.v.11, n.2, p.01-06, 2004.

CAMPOS, C. I. *Propriedades físico-mecânicas de MDF a partir de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores*. 2005. 102f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; COIADO CHAMMA, P. V. Painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v.19, n. 1, p. 47-53, 2009.

CONTRERAS, W. M. et al. Diseño de Tableros de Partículas de Caña Brava y Adhesivo Fenol – Formaldehído. *Rev. For. Lat*, n. 39, p. 39- 55, 2006.

CREWDSON, M. Outdoor weathering must verify accelerated testing. Q-Lab Weathering = Research Service 1005 SW 18th Avenue Homestead, FL 33034-1725 U.S.A mcrewdson@q-lab.com.2009 Acesso em: 25 jun. 2013.

DANIEL, G. F.; NILSSON, T. Developments in the study of soft rot and bacterial decay. In: BRUCE, A.; PALFREMAN, J. W. (Eds.) *Forest Products Biotechnology*. London:Taylor and Francis, p. 37-62, 1998.

EUROPEAN STANDARD EN 113:1996, Wood preservatives — Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes — Determination of the toxic values. 1996, 34 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. European Standard. DIN EN 321 Wood-based panels. Determination of moisture resistance under cyclic test conditions. 2001, p. 1-7.

FABIYI, J. et al.. Wood plastic composites weathering: visual appearance and chemical changes. *Polymer Degradation and Stability*, p 93 (8)1405-14, 2008.

FIORELLI, J.et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. *Industrial Crops and Products* (Print), v. 40, p. 69-75, 2012.

FIORELLI, J. et al. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. *Materials Research* (São Carlos. Impresso), p. 01-08, 2013.

GATANI, M. et al. New Process for Peanut Husks Panels: Incorporation of Castor Oil Polyurethane Adhesive and Different Particle Sizes. *Key Engineering Materials* (Online), v. 600, p. 452-459, 2014.

GARZON, N. et al. Durability evaluation of agroindustrial waste based particle boards using accelerated aging cycling tests. *Key Engineering Materials,* Pfaffikon, v. 517, p. 628-634, 2012.

HAYASHI, T.; MIYATAKE, A.; HARADA, M. Outdoor exposure tests of structural laminated veneer lumber. *Journal of Wood Science*, v. 48, p.69–74, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Madeira*: Uso sustentável na construção civil. Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP), São Paulo, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. *Manual*: Biodeterioração de madeiras em edifícios. São Paulo, 2001, p. 54.

IWAKIRI, S. *Painéis de madeira reconstituída*. Curitiba: FUPEF, 274 p. 2005.

JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. Durabilidade de compósitos de cimento e fibras vegetais. Workshop: Durabilidade das construções. São Leopoldo/RS,1997, p 19-29.

KARLSSON, P.; MCNATT, J. D.; VERRILL, S. P. Vacuum-pressure soak plus ovendry as an accelerated-aging test for wood-based panel products. *Forest Prod Journal*, v. 46, p. 84–88, 1996.

KOJIMA, Y.; SHIMODA, T.; SUZUKI, S. Modified method for evaluating weathering intensity using outdoor exposure tests on wood-based panels. *J Wood Sci,* v.58, p 525–531,2012

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. Faculty of Agriculture, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, *J Wood Sci,* Japan, v. 57, p 7-13. 2010.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using bending properties after accelerated aging treatments. Faculty of Agriculture, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, *J Wood Sci*, Japan, v. 57, p 126-133, 2011.

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. A review: Application of agro-waste for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 872–878, 2013.

MALONEY, T.M. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*. v.46, n.2, p. 19-26. 1996.

MELO, R. R. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 19, n. 3/4, p. 449-460, 2009.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. *Revista da Madeira Wood Magazine*, Edição Especial - Painéis, p.12, 2003.

MENEZZI, S.C.H et al. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. *International Biodeterioration & Biodegradation,* v 62, p. 448–454, 2008

MONTEIRO, M. B.; FREITAS, A. R. Método de ensaio acelerado para avaliação da durabilidade natural de madeiras. *Revista Árvore*, Viçosa, v.21, n.4, p.555-561, 1997.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. *O. Microbiologia e bioquímica do solo*. 2 ed. Lavras:UFLA, 2006. 729 p.

MORESCHI, J. C. Os causadores de danos a madeira. Revista da Madeira, Sao Paulo, v. 4, n. 24, p. 20-22, 1995.

OKUDA, O.; SATO, S. Bond durability of kenaf core binderless boards II: outdoor exposure test. *J. Wood Sci*. p. 54:36-44, 2008.

PABLO, A. A.; PEREZ, E. B.; ELLA, A. B. Development of particleboard on a pilot-plant and semi-commercial scale using plantation and secondary wood species and agricultural fibrous waste materials. Forest Products Research and Industries Development Commission, University of the Philippines, Philippines, 1975.

PASSOS, P. R. A. *Destinação sustentável de cascas de coco verde (Cocos nucifera): obtenção de telhas e chapas de partículas*. 2005. 166f. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005

Q-LAB. Bulletin LL-9025.Outdoor Weathering: Basic Exposure Procedures.p 8.2011. Disponível em: <http://www.q-lab.com/resources/technical-bulletins.aspx>. Acesso em: 05 fev.2012.

SARTORI, D.; CRAVO, MACHADO J;, N GARZON ; FIORELLI, J ; SAVASTANO JUNIOR H. Painel em Madeira de Reflorestamento e Chapas de Partículas para Instalações Rurais. *Floresta e Ambiente*, v. 19, p. 171-178, 2012.

SCHEFFER T.C. Microbiological Degradation and the causal organisms. Chapter of book 2. Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. v. 1. *Degradation and protection of wood*. Darrel D. Nicholas, Editor. p. 31-105, 1973.

SEKINO, N. Outdoor and indoor exposure test of wood based panels. *Wood Industry*, v. 58, n.7, p. 298-304, 2003.

SILVA, S.A.M.; LAHR, FRANCISCO A.R.. Chapas de partículas confeccionadas com resíduos de madeiras tropicais de baixa densidade.Capítulo 14 do livro: Reciclagem de resíduos para a construção civil. Editora da Universidade FUMEC-DEA.P.343-365. Belo Horizonte – MG. 2008.

SILVA, M.S.A ; AZAMBUJA M; SEGANTINI, A.A. Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada confeccionadas com partículas de madeira tropical e poliuretana derivada de óleo de mamona. Capítulo 4. Painéis de Partícula de Madeira e de materiais lignocelulósicos / São Carlos EESC/USP, 2013, 339 p. ISBN 9788580230192 2013.

STARK, N. M. Effect of weathering cycle and manufacturing method on performance of wood flour and high-density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 100, p.3131-3140, 2006.

STARK, N. M., MATUANA, L. M., CLEMONS, C. M. Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 93, p.1021-1030, 2004.

TANACA, H. K. et al. Discoloration and fungal growth on three fiber cement formulations exposed in urban, rural and coastal zones. *Building and Environment*, v. 46, p. 324-330, 2011.

VALARELLI I. de D. et al.. Avaliação do desempenho de painéis de partículas aglomeradas de bambu da espécie Dendrocalamus giganteus. Capitulo 8. Paineis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos EESC/USP. P 145, 2013.

WIDYORINI, R.; XU, J.; UMEMURA, K., KAWAI, S Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse: effects of raw material type, storange methods and manufacturing process. *Journal of wood science*, v. 52, n. 6, p. 648-654, 2005.

YOUNGQUIST,J.A.Wood-bases Composites and panel products Forest Products Laboratory. *Wood handbook*—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Forest Products Laboratory. 463 p.1999

ZENID, G. J. Madeiras e suas características. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Eds.).*Tecnologias aplicadas ao setor Madeireiro*, Jerônimo Monteiro:Suprema Gráfica e Editora, p.125 -158, 2007.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C008

Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto

8

Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Angela Borges Masuero
Jairo José de Oliveira Andrade
Edna Possan
João Ricardo Masuero
Marina Martins Mennucci

1. Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias, processos construtivos e materiais de construção tem fomentado a construção de edificações cada vez mais esbeltas e econômicas. Porém, a carência de mão de obra especializada, a alta competitividade do setor e/ou a busca por maiores lucros por meio da redução dos custos de produção têm interferido negativamente na qualidade das habitações produzidas no Brasil nos últimos anos.

É comum encontrar construções com níveis de degradação superior aos desejados com problemas relacionados à qualidade e à durabilidade devido a falhas de execução e ao aparecimento de manifestações patológicas, o que afeta a estética, a segurança, a usabilidade e a vida útil das edificações.

Visando à melhoria da qualidade dos produtos da indústria da construção como um todo, entrou em vigor, em 2013, a "Norma de Desempenho" (ABNT NBR 15575, 2013) que estabelece parâmetros mínimos de desempenho[1] para os sistemas construtivos, bem como para as edificações habitacionais, de modo a atender as necessidades e exigências dos usuários ao longo do ciclo de vida da habitação, atuando de forma complementar com o conjunto de normas prescritivas da ABNT vigentes e já difundidas na comunidade da construção.

1. Comportamento em uso.

Para cada um dos sistemas[2] que compõe a edificação, o documento insere 12 critérios de desempenho[3], sendo um deles o de "durabilidade", em atendimento aos requisitos[4] de segurança e qualidade.

A durabilidade de cada sistema que compõe a edificação pode ser mensurada por meio da vida útil de projeto (VUP), que é o período de tempo compreendido entre o início de operação e uso de uma edificação até o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário, sendo diretamente influenciada pelas atividades de manutenção e reparo e pelo ambiente de exposição. A NBR 15575 (2013) resume vida útil como "uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes".

Cabe destacar que a maioria dos estudos de previsão de vida útil de um projeto é voltada ao sistema "estruturas", visto ele ser considerado o principal sistema da edificação, por conta da exigência normativa de maior tempo de vida útil (VUP mínima de 50 anos) e pela eventual inviabilidade da substituição, alteração ou retirada de qualquer elemento ou componente que o constitua devido aos custos elevados, à dificuldade técnico-executiva e aos riscos associados.

Deve-se considerar que a norma de desempenho NBR 15575 (2013) não exclui a validade das demais normas existentes, como o caso da NBR 6118 (ABNT, 2014) e da NBR 12655 (ABNT, 2015), que apesar de especificarem valores de cobrimento da armadura, relações água/cimento máximas e resistências mínimas em função da agressividade ambiental, não apresentam elementos necessários para estimar a vida útil das estruturas. Da mesma forma, existem diversas normas brasileiras de ensaios de durabilidade (ABNT NBR 9779:2012; ABNT NBR 10787:2011; ABNT NBR 15577-1:2008, entre

2. Conjunto de componentes e elementos com função definida (exemplos: o "sistema estrutural" - com a função de dar suporte à edificação, é formado pelo conjunto de elementos estruturais "vigas, lajes e pilares" - produzidos com o componente "concreto armado". Já o sistema "vedações verticais" – com a função de proteger e vedar a edificação, é formado pelos elementos "paredes de alvenaria" por sua vez produzido com os componentes "argamassa" e "blocos cerâmicos ou de concreto").

3. Critérios de desempenho são especificações quantitativas dos requisitos de desempenho (qualitativos), expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados (NBR 15575-1:2013).

4. Requisitos de desempenho são condições que expressam qualitativamente os atributos que a edificação e suas partes devem possuir, a fim de que possam satisfazer às exigências do usuário (NBR 15575-1:2013).

outras), bastante apropriadas para comparar diferentes materiais e sistemas construtivos, porém não fornecem estimativas de vida útil das estruturas.

Nesse contexto, vários modelos de previsão de vida útil, que possam descrever adequadamente o processo de degradação das estruturas de concreto armado ao longo do tempo, vêm sendo desenvolvidos. Muitos destes modelos abordam a corrosão das armaduras, que é a manifestação patológica preponderante nas estruturas de concreto, cujos mesmos tentam modelar a penetração dos principais agentes agressivos responsáveis pela despassivação da armadura: os íons cloreto e o dióxido de carbono (CO2) (HAMADA, 1969; HO e LEWIS, 1987, PAPADAKIS et al., 1991a, PAPADAKIS et al., 1991b; JIANG et al., 2000; HYVERT, 2009, TUUTTI, 1982; UJI et al., 1990; MANGAT et al., 1994; MEJLBRO, 1996; ANDRADE, 2001; entre outros). Como a maioria dos modelos de previsão de vida útil existentes na bibliografia são bastante complexos, este capítulo tem como objetivo apresentar modelos de previsão de vida útil a serem adotados para avaliação de sistemas construtivos em concreto armado (modelos que sejam de fácil aplicação, a partir de dados de entrada possíveis de serem determinados sem ensaios adicionais em laboratório), bem como medir as variabilidades existentes nos processos de produção do concreto armado e nos ambientes, de forma a utilizar em modelos de previsão de cunho probabilísticos. Conhecer estas variabilidades e propor formas de minimizá-las é de suma importância para que se possa garantir uma VUP mínima para uma estrutura construída em concreto.

2. Normalização Referente à Durabilidade e Previsão de Vida Útil de Sistemas Estruturais em Concreto

A crescente preocupação com a durabilidade e vida útil das edificações em concreto armado instigou a comunidade técnico-científica a desenvolver soluções para minimizar os danos decorrentes do processo de degradação. Nesse sentido, organizações como a Federação Internacional do Concreto Estrutural – *fib*[5] (*Fédération Internationale Du Béton*) – e o Instituto Americano do Concreto – ACI (*American Concrete Institute*) – por meio de seus comitês técnicos e grupos de trabalhos, têm desenvolvido relatórios e práticas recomendadas com o intuito de resolver problemas dessa natureza.

5. Organização internacional criada em 1998, a partir da fusão de duas entidades independentes, que existiam desde 1952: o CEB (Comité Euro-International du Béton) e a FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte).

Primeiramente, essas instituições desenvolveram roteiros relacionados à durabilidade do concreto, destacando-se o ACI 201 (1992) – "*Guide to Durable Concrete*" –, o CEB 183 (1992) – "*Durable concrete structures*" – e o CEB 238 (1997) – "*New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion*".

Tanto a *fib* como o ACI, por meio de seus comitês, deram início aos estudos relacionados à previsão de vida útil, englobando também a análise do ciclo de vida (ACV). Nos boletins publicados, apresenta-se uma visão holística, que abrange desde aspectos relacionados à concepção, projeto, execução, utilização, manutenção, adequação, até fatores de ordem econômica. Dentre as publicações da área, destacam-se o ACI 365 (2000) e o *fib* 34 (2006).

O ACI 365 (2000), intitulado "*Service Life Prediction: state-of-the-art report"*, apresenta informações orientadas à predição de vida útil de estruturas de concreto armado, tanto novas como existentes, oferecendo dados sobre os fatores que controlam a vida útil das estruturas, metodologias para a avaliação da condição de estruturas existentes e técnicas matemáticas voltadas à predição de vida útil. O relatório também discute alguns aspectos econômicos concernentes à vida útil das estruturas de concreto, incluindo a análise do custo do ciclo de vida.

O "*Model Code for Service Life Design*" – *fib* 34 (2006) foi instaurado com o objetivo de identificar modelos consensuais relacionados à durabilidade e de preparar uma estrutura física voltada à normalização do projeto baseada na aproximação de desempenho. Destina-se à previsão de vida útil de estruturas de concreto simples, armado e protendido, com foco especial nas prescrições de projeto que tem como objetivo controlar os efeitos adversos da degradação, considerando as ações ambientais que conduzem à deterioração do aço imerso no concreto. A metodologia descrita nesse documento também pode ser aplicada para a avaliação da vida útil de estruturas existentes.

Nesse sentido, destacam-se ainda as publicações ISO 15686 e EUROCODE 2. A norma ISO 15686 (2011) "*Buildings and constructed assets: Service life planning*" e complementares (de 1 a 11) destinam-se ao estudo da durabilidade, abrangendo a vida útil, o ciclo de vida e o impacto ambiental das edificações. O EUROCODE 2 (2004) "*Design of concrete structures*" e suas partes 1, 2 e 3, em relação à publicação anterior de 1992, inserem uma nova abordagem para o projeto de estruturas de concreto, trazendo critérios baseados em conceitos probabilísticos. A nova versão da norma ISO 13823 (2008) "*General principles*

on the design of structures for durability" enfatiza que é necessário garantir a confiabilidade do desempenho de uma estrutura desde a concepção até o final da sua vida útil, recomendando que procedimentos probabilísticos sejam empregados. Nessa mesma linha conceitual, cita-se ainda o *fib* 53 (2010) "*Design of durable concrete structures*".

Com o intuito de criar um código do concreto e promover a cooperação e o entendimento entre as nações integrantes do continente Asiático e da Região do Pacífico, foi desenvolvido pelo ICCMC[6], em parceria com JCI[7], o *"Asian Concrete Model Code"* – ACMC (2006). O objetivo principal desse código é elevar o padrão de desempenho estrutural e de segurança das estruturas de concreto frente às condições sociais e ambientais, coletando padrões e práticas utilizadas em cada país, a fim de desenvolver um modelo comum para todo o território Asiático. O ACMC contempla o projeto, a construção e a manutenção, os quais podem ser convertidos e adaptados dentro dos diferentes contextos.

Na África também está em desenvolvimento o Código Africano do Concreto, o ACC (*African Concrete Code*), que tem por objetivo atuar como um guia para o projeto de estruturas de concreto duráveis, úteis, econômicas e seguras, em harmonia com o ambiente natural e social do continente, servindo como ferramenta para facilitar e acelerar o desenvolvimento econômico e a transferência de tecnologia, no campo da engenharia do concreto, entre a região Africana e a Comunidade Internacional. Contando com a participação de especialistas da Europa, da Ásia, dos Estados Unidos e da África, um simpósio realizado em 2005[8] oficializou o início dos trabalhos. NGAB (2005) relata que as características climáticas, a qualidade dos materiais e o nível econômico e social desse continente são relativamente distintos dos referenciados nos códigos internacionais, justificando a implantação do ACC.

Além dos relatórios, códigos e boletins técnicos já desenvolvidos pelos comitês e grupos de pesquisa (como o ACI, a *fib* e o ACMC) e em desenvolvimento (como o ACC), diversos projetos relacionados ao tema, advindos de vários países do mundo, tem contribuído na evolução dos estudos da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. Como exemplos, citam-

6. *International Committee on Concrete Model Code for Asian*.

7. *Japan Concrete Institute*.

8. Em 2006 e 2007, respectivamente, foram realizados o segundo e o terceiro Simpósio Africano do Concreto em prol ao ACC Code, cujos resultados estão disponíveis no site http://www.acmc-ngo.org/.

se os projetos DURACRETE (1999), LIFECON (2003), DARTS (2003), DURACON (2004), entre outros.

Com o intuito de obter uma probabilidade aceitável para o projeto de durabilidade de estruturas de concreto armado, conferindo desempenho satisfatório durante a vida útil requerida, o DURACRETE – "*Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*" – projeto de pesquisa Europeu, desenvolvido entre 1996-1999, foi um dos pioneiros na área. Nele, os princípios da teoria de confiabilidade, já aplicados no projeto estrutural, foram inseridos para o projeto de durabilidade.

Em virtude da crescente necessidade de manutenção, reparo e modernização de antigas infraestruturas civis da Europa (como pontes, portos, túneis, usina hidrelétricas, plataformas *off-shore*, assim como edifícios públicos), a Comunidade Europeia, sob o programa de sustentabilidade e crescimento competitivo (1998 – 2002), desenvolveu o projeto LIFECON[9] (2003). Tal projeto objetiva desenvolver e validar um modelo Europeu genérico e aberto[10] para integração e predição dos sistemas de manutenção e de planejamento e gerenciamento do ciclo de vida (LMS[11]) de infraestruturas de concreto que facilite alterações na gestão e manutenção de *facilities*[12]; trabalhe com os princípios do ciclo de vida e inclua aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável, atendendo às exigências humanas (uso, segurança, saúde e conforto), ao desempenho técnico, econômico e ecológico, assim como à aceitação cultural.

O projeto contempla aspectos necessários à classificação quantitativa das cargas de degradação, estimativa da vida útil total e residual, sobretudo devido à ação de íons cloretos, carbonatação e sais de degelo, ao planejamento e gerenciamento de ações de manutenção e à análise do custo do ciclo de vida de estruturas e infraestruturas de concreto. Esses aspectos são atrelados a modelos matemáticos (probabilísticos e semiprobabilísticos), à teoria de confiabilidade e a fatores socioeconômicos. Para atender o objetivo proposto, o projeto LIFECON contou com a participação da comunidade acadêmica, tecnológica

9. *Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability*.

10. O atributo "aberto" *open* (em inglês) significa que o sistema é genérico (generalizável) e permite que se façam modificações/alterações de acordo com as necessidades dos ativos, organizações e agências.

11. LMS - *Life cycle Maintenance and Management planning System*.

12. Gestão de *facilities* é a gestão estratégica de pessoas, espaço, processos de trabalho e investimento dentro de um ambiente organizacional (FERREIRA, 2005, p.14). Ressalta-se que a palavra inglesa *facilities* não foi traduzida, pois não se encontrou, na língua Portuguesa, um termo que a expressasse adequadamente.

e construtiva da União Européia, gerando um manual disponibilizado na internet, no qual são descritos os principais processos do sistema proposto, incluindo diferentes análises, aproximações, métodos e soluções matemáticas.

Destaca-se ainda o projeto DARTS[13] - "*Durable and Reliable Tunnels Structures*" – que objetiva o desenvolvimento de ferramentas práticas para dar suporte pró-ativo ao processo de tomada de decisão da escolha da alternativa ótima. Neste contexto, consideram-se aspectos associados com custos, tipo e processo de construção, manutenção, condições ambientais, qualidades técnicas e segurança ao longo da vida útil de túneis.

Sob coordenação do CYTED[14] (1998), em 2000 teve início o projeto DURACON (2004)[15], o qual objetiva: correlacionar a durabilidade de diferentes concretos com as características ambientais reinantes na Ibero América[16]; estimar, de acordo com o clima de cada região, o teor de cloretos necessário para desencadear a corrosão do aço e propor modelos de previsão de vida útil adequados aos ambientes de estudo. Mediante a exposição de corpos de prova com e sem armadura, em no mínimo duas atmosferas distintas, sendo uma marinha e outra urbana, em cada país Ibero-Americano participante, monitorou-se a evolução da degradação dos concretos ao longo do tempo, no intuito de correlacionar os dados dos ensaios acelerados com os de estruturas reais. Como resultado, tem-se o mapeamento da agressividade do ambiente de exposição da região de estudo.

O Brasil participou desse projeto contando com quatro estações de envelhecimento natural, localizadas em Goiânia (GO), Natal (RN), Rio Grande (RS) e São Paulo (SP). O trabalho publicado por Rincón (2006) apresenta os resultados preliminares do estudo. No país, ainda há o projeto DURAR[17] (Rede Brasileira de Estações de Envelhecimento Natural), que por meio da criação de uma rede de estações em localidades distintas (Belém, PA; Rio Grande, RS; São Paulo e Pirassununga, SP), objetiva o estudo da influência do clima na degradação de materiais e componentes de construção, dando suporte às atividades de pesquisa e desenvolvimento no país.

---

13. Informações sobre o projeto no site: http://www.dartsproject.net/.
14. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
15. Influência da ação do meio ambiente na durabilidade do concreto: Projeto DURACON, Brasil.
16. Fazem parte desta região os países: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Cuba, Espanha, México, Peru, Portugal, Uruguai e Venezuela.
17. Maiores informações no site http://durar.pcc.usp.br/index.htm.

No Brasil, a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575, 2013), lançada em 2013, constitui-se no principal documento normativo voltado ao desempenho de edificações habitacionais, com vistas à melhoria da qualidade. Objetiva estabelecer uma sistemática de avaliação de tecnologias e sistemas construtivos habitacionais, tendo como base requisitos e critérios de desempenho expressos em normas técnicas brasileiras vigentes. Também leva em conta a durabilidade e a vida útil das estruturas e suas partes, sugerindo a modelagem matemática como ferramenta para as estimativas de vida útil e análise de desempenho, embora não apresente modelos de aplicação prática para tal. No mesmo ano, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) lançou um guia orientativo como leitura complementar à norma com o intuito de cooperar com a comunidade da construção civil e promover a difusão da norma de desempenho em todo o país (CBIC, 2015). Também se destaca a revisão da ABNT NBR 6118:2014 (antiga NB 1) que, de forma prescritiva, tenta inserir as questões de durabilidade e vida útil no projeto de estruturas de concreto.

Destaca-se que os projetos DURACRETE (1999) e LIFECON (2003) sugerem, em seus relatórios, que as considerações de projeto para a durabilidade e as estimativas de vida útil das estruturas de concreto devem derivar de uma abordagem probabilística, destinando, principalmente, a teoria de confiabilidade para esse fim. O projeto DURACON (2004) ainda discorre acerca dos aspectos determinísticos do processo de degradação.

Os conceitos de durabilidade apresentados nas revisões recentes dos códigos e normas internacionais (ACI, *fib* e ISO) são fundamentados em modelos matemáticos, os quais buscam descrever os mecanismos de degradação atuantes na estrutura, incorporando conhecimento de várias áreas (multidisciplinar), como a estatística, a ciência e tecnologia dos materiais, a economia, o projeto e a execução. Dados de inspeções, manutenção e reparo de estruturas existentes, dados de ensaios acelerados e o conhecimento de especialistas são usados nos modelos para identificar e calibrar os parâmetros críticos de entrada dessas informações, possibilitando a estimativa mais aproximada e coerente da vida útil de estruturas de concreto.

3. Desempenho, Durabilidade e Vida Útil

A degradação das edificações ou suas partes e a consequente redução de seu desempenho deve-se especialmente à agressividade do ambiente de exposição

e ao surgimento de manifestações patológicas (trincas, fissuras, corrosão, entre outras).

O uso incorreto e/ou a baixa qualidade dos materiais de construção, problemas de projeto e de execução e a ausência ou falha nas ações de manutenção reduzem a qualidade da construção, causando um envelhecimento precoce, com influência direta nos custos de operação, manutenção e reparo. Em estudo realizado no Brasil, Meira e Padaratz (2002) observaram que os investimentos em intervenções de manutenção, em uma estrutura com alto grau de deterioração, podem chegar a aproximadamente 40% dos custos de execução do componente degradado.

Permanece o desafio de como projetar edificações duráveis, com no mínimo 50 anos de vida útil. Tem ocorrido nos últimos anos um grande número de desabamentos e colapso de estruturas ou de suas partes[18,19,20,21], por meio dos quais se verifica que a vida útil das construções está atingindo valores muito menores do que os previstos em normas (que para a maioria das estruturas é de 50 anos).

Sinistros ocorridos no Brasil, como o acidente no estádio de futebol Fonte Nova[22], assim como os supracitados, causaram prejuízos econômicos, sociais e perdas humanas irreparáveis. Essas ocorrências têm chamado a atenção da comunidade da construção brasileira para a necessidade de se desenvolver projetos para a durabilidade, de se estabelecer um maior controle do projeto e da execução de novas edificações e da necessidade do constante monitoramento e/ou manutenção das obras já existentes, visando à melhoria da qualidade das construções do país e a garantia da vida útil de projeto.

A vida útil é expressa em anos, sendo estabelecida por várias Normas e Códigos do concreto (ver Tabela 1) uma vida útil de projeto (VUP) mínima

18. Desabamento de edifício em reforma, ocorrido em 27 de agosto de 2013, em São Mateus, São Paulo, SP. Dez mortos e 26 feridos.

19. Desabamento de laje, ocorrido em 11 de fevereiro de 2013, em São João da Barra, RJ. Dez feridos e duas vítimas fatais.

20. Desabamento de marquise, ocorrido em 14 de fevereiro de 2013, em Belo Horizonte, MG. Uma vítima fatal.

21. Desabamento de três edifícios, ocorrido em 25 de janeiro de 2012, centro do Rio de Janeiro. Cinco pessoas morreram.

22. Ruptura parcial do anel superior da arquibancada, ocorrida em 25 de novembro de 2007, Estádio Fonte Nova, Salvador, BA, vitimando sete pessoas.

de 50 anos para a maioria das estruturas e 100 anos para estruturas civis, como obras de infraestrutura, pontes, viadutos, barragens, entre outras.

Tabela 1. Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas.

Tipo de estrutura	**Vida útil de projeto (VUP) mínima**				
	BS 7543 (1992)	**ISO 2394 (1998)**	**Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)**	**NBR 15575 (2013)**	**Fib 53 (2010)**
Temporárias	≥ 10 anos	1 a 5 anos	≥ 10 anos	-	-
Partes estruturais substituíveis (Ex.: apoios)	≥ 10 anos	≥ 25 anos	10 a 25 anos	23 a 20 anos	25 a 30 anos
Estruturas para agricultura e semelhantes	-	-	15 a 30 anos	-	-
Estruturas *offshore*	-	-	-	-	≥ 35 anos
Edifícios industriais e reformas	≥ 30 anos	-	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	-	≥ 50 anos	≥ 50 anos	50 anos	≥ 50 anos
Edifícios novos e reformas de edifícios públicos	≥ 60 anos	-	-	-	-
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	-	≥ 100 anos
Edifícios monumentais	-	-	-	-	≥ 200 anos

A Norma de Desempenho brasileira (NBR 15575, 2013) indica a VUP em três níveis: um Mínimo (M); um Intermediário (I); e, um Superior (S), sendo o primeiro obrigatório (ver representação esquemática na Figura 1). Na Tabela 2, apresentam-se os valores de VUP, em anos, especificada pela norma brasileira de desempenho para cada sistema da edificação para os níveis mínimo (M) e superior (S).

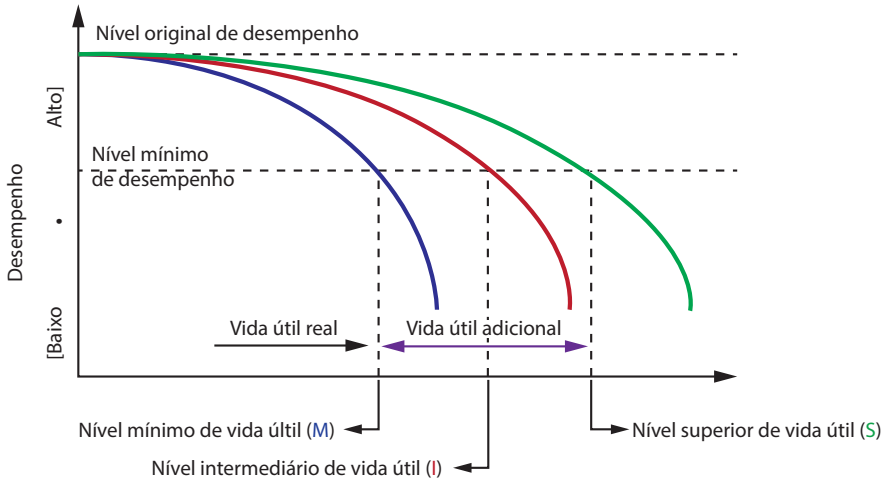


Figura 1. Nível de desempenho × níveis de vida útil (POSSAN; DEMOLINER, 2013, adaptado de *fib* 53, 2010).

Tabela 2. vida útil de projeto (VUP)* (em anos) especificada na NBR 15575:2013.

Sistema	**VUP (em anos)**	
	Mínima (M)	**Superior (S)**
Estrutura	≥ 50**	≥ 75
Pisos Internos	≥ 13	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 30

* Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção (Manual do usuário) entregue ao usuário elaborado em atendimento à norma ABNT NBR 14037.
** Segundo a NBR 8681-2004.

No que se refere à modelagem matemática para determinação da VUP, a norma de desempenho não dá indicativos de como conduzi-la, tampouco existem normas ou recomendações técnicas no Brasil para esse fim.

Logo, como conduzir a modelagem matemática para prever vida útil do sistema "estrutura" de uma edificação? Existem modelos de previsão? Eles são de fácil aplicação pelo setor da construção civil? Como garantir que os valores

de vida útil especificados efetivamente serão atingidos? Tais questionamentos são de extrema relevância e uma discussão sobre as principais questões são apresentadas na sequência.

4. Metodologia para a Modelagem e Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto

Partindo-se do pressuposto que para prever a vida útil de estruturas de concreto tem-se a necessidade de um modelo matemático representativo do dano, Possan (2010) propõe quatro etapas para se conduzir a modelagem e a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado: i) coleta de dados; (ii) modelagem da degradação; (iii) simulação da degradação e (iv) tomada de decisão, conforme fluxograma da Figura 2 (ver também POSSAN, DAL MOLIN e ANDRADE, 2011).

Quando se deseja obter ou melhorar um modelo de degradação, a predição de vida útil pode ser iniciada na etapa 1. Já quando se deseja fazer previsões com modelos já existentes, o processo inicia-se na etapa 3.

A metodologia pode ser empregada para estimativas de vida útil de estruturas já existentes ou novas estruturas. No primeiro caso, é possível estimar quantos anos são necessários para que a estrutura atinja o estado limite desejado (de durabilidade, serviço ou de segurança). No segundo, fornece subsídios para a seleção da espessura de cobrimento, resistência do concreto, tipo de cimento, relação água-cimento, entre outros fatores que influenciam na vida útil de estruturas de concreto. Nos itens seguintes, as etapas descritas na Figura 2 serão detalhadas.

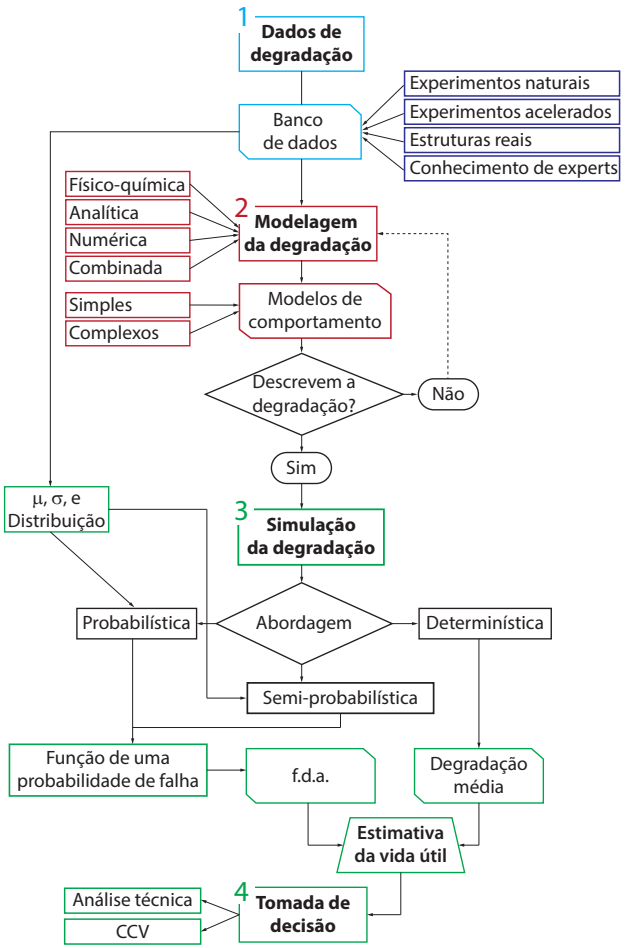


Figura 2. Fluxograma para previsão de vida útil (POSSAN, 2010).

Etapa 1: Dados de Degradação

A coleta de dados é uma das fases essenciais para os estudos de modelagem e previsão de vida útil, demandando a compilação de informações (objetivas ou subjetivas – ver Tabela 3) acerca dos fatores intervenientes no projeto (como espessura de cobrimento, relação água/aglomerante, resistência), no processo construtivo (nível de controle de qualidade da obra, condições de cura), na durabilidade (tipo e teor de agente agressivo, ambiente de exposição da construção) e nas ações de operação, manutenção e reparo da edificação.

Tabela 3. Possíveis fontes de dados de degradação das estruturas de concreto (POSSAN, 2010).

Informação, Dados ou Indicadores		
Tipo	**Origem**	**Observações**
Objetiva	**Testes acelerados**[25] **de laboratório** de desempenho de materiais, fornecendo: – indicadores de desempenho de ações de manutenção, reparo e reabilitação; – indicadores de durabilidade[26]; – indicadores de desempenho das proteções (pinturas em aço, proteção anódica, catódica, entre outras); – agressividade do meio ambiente; etc.	Informações advindas dessas fontes apresentam elevado potencial de uso. O ideal é que elas sejam agrupadas em banco de dados, no intuito de facilitar o acesso à informação e, consequentemente, elevar a confiabilidade dos resultados apresentados. Os bancos de dados podem ser formados com dados de teses, dissertações, artigos acadêmicos, estudos de casos, entre outras fontes confiáveis. Porém, dados de ensaios acelerados precisam ser empregados com cautela, uma vez que para estudos de previsão faz-se necessária a utilização de um coeficiente de aceleração[27] da degradação.
	Investigação *in situ* fornecendo: – os indicadores supracitados; – a velocidade e intensidade do processo de degradação de edificações reais.	
	Indicadores de desempenho e eficiência fornecidos pelo fabricante ou mantenedor do componente, subsistema e sistema.	Essas informações também são de utilidade para determinação ou avaliação dos prazos de garantia.
Subjetiva	**Experiência de especialistas**	Na carência de dados reais, informações advindas do conhecimento de *experts* podem ser empregadas nos estudos. Para tal, empregam-se a técnica de grupo focal e o Método Delphi[28].

23. Ensaios acelerados são testes comparativos do desempenho de durabilidade de um determinado material, fornecendo resultados em curtos espaços de tempo.

24. Indicador de durabilidade: são propriedades, como porosidade, coeficiente de difusão, teor de $Ca(OH)_2$, entre outras, determinadas por meio de testes de laboratório, que auxiliam na avaliação qualitativa ou quantitativa do potencial de durabilidade de um material (BAROGHEL-BOUNY, 2004).

25. Expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação natural, sendo relativo aos concretos estudados e às condições de exposição impostas nos dois procedimentos de ensaio (POSSAN, 2004). A determinação desses dados é bastante complexa devido às viabilidades inerentes à degradação.

26. Técnica para a busca de um consenso de opiniões de um determinado grupo de especialistas para um dado tema. O método pressupõe que o julgamento coletivo, quando bem organizado, é melhor que a opinião de um só indivíduo. Baseado na consulta estruturada, por meio de um questionário aplicado a um grupo de especialistas, os quais são arguidos até que se obtenha uma convergência das respostas do grupo.

Cabe destacar a importância de se conhecer o ambiente de exposição da edificação (se marinho, urbano, rural ou industrial) e o grau de agressividade do mesmo (pouco agressivo, agressivo, muito agressivo, entre outros, representado pelo teor de CO_2[27] do ambiente ou teor de cloretos ou teor de sulfatos) assim como a temperatura e a umidade relativa média do local de construção da edificação. As informações darão subsídio tanto para a modelagem quando para a simulação de vida útil, uma vez que o ambiente de exposição influi diretamente na velocidade e intensidade da degradação da edificação.

Etapa 2: Modelagem da Degradação

De maneira geral, quando se trata de desenvolvimento de modelos de degradação, há duas fundamentações predominantes: uma empírica e outra fenomenológica ou complexa. A primeira baseia-se na experiência adquirida e em resultados de ensaios já realizados, aplicando, sobretudo, técnicas estatísticas de análise e ajustes de dados na modelagem. Fazem parte desse grupo os modelos de Hamada (1969), Ho e Lewe**s** (1987), Jiang et al. (2000), Andrade (2001), Possan (2010), entre outros. Já a segunda fundamenta-se nas leis gerais da natureza – para o estudo da carbonatação, leis físicas e químicas – e deduções algébricas. Os modelos provenientes dessas modelagens são criados com base no conhecimento e na análise dos mecanismos e da cinética da degradação, destacando-se, nesse caso, os modelos de Papadakis et al. (1989 e 1991), Saetta e Vitaliani (2004), Thiéry (2005), Hyvert (2009), entre outros.

Os modelos empíricos, também denominados de simplificados, são fundamentados em ajustes de dados de campo ou de laboratório ou baseados na experiência de especialistas e, em geral, possuem solução analítica. Os modelos complexos ou fenomenológicos são baseados em leis físico-químicas, como as leis de conservação de massa de CO_2 e de água e, dada a complexidade, exigem soluções numéricas (ver quadro comparativo na Tabela 4).

27. Em caso de não ser possível medir o teor de CO_2, pode ser empregado o teor médio de CO_2 da atmosfera de 350 ppm para ambientes agressivos, 800 ppm para ambientes muito agressivos (grandes cidades, túneis) e 250 ppm para ambientes pouco agressivos (rurais).

Tabela 4. Modelos empíricos x modelos complexos (POSSAN, 2010).

Fator	Modelos Empíricos	Modelos Complexos
Fundamentação	Experiência de *experts*, dados históricos e dados de ensaios de campo e laboratório	Leis da natureza (físicas e químicas), formulações algébricas, etc.
Parâmetros de entrada	Em geral simples, de fácil obtenção	Normalmente exigem a realização de ensaios para determinação – alguns são de difícil obtenção
Precisão	Erro associado pode ser elevado	Tende a reduzir os erros
Simulação computacional	Simples, em geral, analítica	Complexa, em geral numérica, demanda tempos elevados
Aplicação prática	Fácil	Difícil
Extrapolação	Pode intervir na confiabilidade	Se bem elaborado, admite extrapolações
Generalização	Aplicável aos intervalos de informações que deram origem ao modelo	Aplicável a todas as situações regidas pelas leis que o compõe

Em geral, os modelos empíricos são mais fáceis de serem aplicados, entretanto apresentam simplificações, o que pode resultar em resultados menos precisos. Já os complexos consideram um maior número de variáveis de influência no processo de degradação, tendendo a uma maior precisão e generalização, todavia, são mais difíceis de serem aplicados.

Existem diversos modelos na literatura que podem ser empregados para estimativas de vida útil. Entretanto, a grande maioria exige dados de entrada que demandam ensaios prévios laboratoriais (como, por exemplo, coeficiente de difusão de cloretos, tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, reserva alcalina, entre outros). Este fato dificulta a utilização de tais modelos pela indústria da construção para a tomada de decisão quando da especificação e utilização do concreto armado. Desta forma, selecionaram-se dois modelos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do NORIE/UFRGS, um para cada mecanismo principal de despassivação das armaduras (cloretos e carbonatação), descritos na sequência.

a) Modelo para Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto: Iniciação por Cloretos

Considerando que a corrosão das armaduras é o fenômeno mais incidentes nas estruturas de concreto, ANDRADE (2001) desenvolveu um modelo matemático para representar a penetração de cloretos (que é um dos agentes que podem iniciar o processo corrosivo). Primeiramente foi considerado que tal fenômeno depende basicamente de algumas características relacionadas ao material e ao meio ambiente. Os principais fatores que influenciam no transporte de cloretos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Principais parâmetros que influenciam na penetração de cloretos.

Características do concreto	**Símbolo**	**Unidade**
Resistência à compressão (28 dias)	f_{ck}	MPa
Tipo de cimento	K_1	–
Tipo de adição	K_2	–
Quantidade de adição	*Ad*	%[1]
Características ambientais		
Temperatura média (ºC)	*T*	ºC
Umidade relativa (%)	*UR*	%
Concentração de cloretos (%)	Cl^-	%[1]

[1] Em relação à massa de cimento.

A penetração de cloretos é proporcional à temperatura, à umidade relativa e à concentração externa de cloretos, sendo inversamente proporcional à resistência à compressão do concreto, ao tipo de cimento e ao tipo e quantidade de adições minerais. Assim, empregando esse princípio e considerando que existe um efeito multiplicativo entre as variáveis básicas, a forma geral do modelo pode ser representada pela Equação 1.

$$y_{0,4\%} = K_0 \cdot \frac{UR^{b_1} \cdot T^{b_2} \cdot Cl^{b_3}}{K_1 \cdot f_{ck}{}^{b_4} \cdot K_2 \cdot (1+Ad)^{b_5}} \cdot t^{b_6} \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

$y_{0,4\%}$ = posição da concentração crítica de cloretos (C_{cr}) a partir da superfície do concreto (mm);

K_0 = constante geral;

b_1 a b_6 = coeficientes das variáveis.

A realização de um trabalho experimental completo para determinar os valores dos coeficientes e das constantes para todas as combinações possíveis demandaria bastante tempo e consumiria muitos recursos para a obtenção dos resultados. Dessa forma, foi realizado um experimento em grupos focais (ou *focus groups*), em que especialistas foram convidados para responder algumas questões sobre durabilidade das estruturas. Grupos focais são fóruns que reúnem um pequeno grupo de indivíduos para conversar sobre um tópico de interesse. Basicamente, pode ser considerado como uma entrevista em grupo, embora não com o senso de alternância no qual um pesquisador questiona e os participantes respondem. Ao invés, sua essência consiste na interação entre os indivíduos, baseando-se em tópicos que são promovidos pelo investigador, o qual normalmente assume o papel de moderador da sessão (MORGAN, 1997). O experimento em grupos focais é recomendado para dar orientação em investigações relativas a novos campos de pesquisa, com objetivo de gerar hipóteses baseadas na percepção dos especialistas, avaliar diferentes cenários de pesquisa e fornecer informações adicionais em um estudo em larga escala. Tal ferramenta é empregada em muitos campos exploratórios, como na Engenharia de Produção e nas Ciências Sociais. Na engenharia civil, são raros os trabalhos que empregam essa técnica, destacando-se os trabalhos de Andrade (2001), Bust et al. (2005) e Possan (2010).

Por meio do emprego do experimento em grupos focais obtiveram-se os valores dos coeficientes, cujo modelo final é representado pela Equação 2 (ANDRADE, 2001).

$$y_{0,4\%} = 7{,}35 \cdot \frac{UR^{0,7} \cdot T^{0,1} \cdot Cl^{0,7}}{K_1 \cdot f_{ck} \cdot K_2 \cdot (1 + Ad)^{0,2}} \cdot \sqrt{t} \qquad \text{Equação 2}$$

onde:

$y_{0,4\%}$ = posição da concentração crítica de cloretos (C_{cr}) a partir da superfície do concreto (mm);

UR = umidade ambiental (%);

T = temperatura ambiental (ºC);

Cl = concentração superficial de cloretos (%);

K_1 = fator que varia em função do tipo de cimento (Tabela 6a);

f_{ck} = resistência à compressão (28 dias) (MPa);

K_2 = fator que leva em consideração o tipo de adição empregada no concreto, valendo 1,0 quando não se empregam adições (Tabela 6b);

Ad = quantidade de adição empregada no concreto (%); e

t = tempo (anos).

Tabela 6. Coeficientes do modelo em função do tipo de cimento (a) e do tipo de adição (b).

(a)

K_1	Tipo de cimento
0,98	CP II E
1,00	CP II F
1,05	CP II Z
1,21	CP III
1,17	CP IV
0,95	CP V ARI

(b)

K_2	Tipo de adição
1,00	Sílica ativa
0,97	Metacaulim
0,76	Cinza de casca de arroz

Pode ser observado que o valor do coeficiente b_6 determinado pela análise é igual a 0,5, valor coerente com a teoria que considera que a penetração de cloretos é proporcional à raiz quadrada do tempo.

Ao se comparar os resultados fornecidos pelo modelo com dados reais obtidos por meio de análises em uma estrutura, verificou-se que o mesmo apresentou níveis de resposta similares à penetração de cloretos medida in situ. Algumas diferenças encontradas podem ser atribuídas a determinados fatores, principalmente às variabilidades existentes nas características do concreto, nas condições ambientais e no processo de extração de amostras e de análise dos resultados.

b) Modelo para Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto: Iniciação por Carbonatação

Seguindo o mesmo procedimento metodológico, Possan (2010) desenvolveu um modelo para prever o avanço da frente de carbonatação em concretos, conforme apresentado na equação 3.

$$x_{ec}(t) = k_c * \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} * \left(\frac{t}{20}\right)^{0,5} * \exp\left[\left(\frac{k_{ad} * ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{co_2} * co_2^{0,5}}{60 + f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR} * (UR - 0,58)^2}{100 + f_c}\right)\right] * k_{ce}$$

Equação 3

onde:

$x_{ec}(t)$ = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 7a);

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 7a);

t = idade do concreto, em anos;

ad = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 7a);

UR = umidade relativa média, em %*0,01;

k_{ur} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 7a);

CO_2 = teor de CO_2 da atmosfera, em %.

k_{co2} = fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 7a);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva em função das condições de exposição da estrutura (Tabela 7b).

Tabela 7. coeficientes do modelo em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição.

(a)						(b)	
Tipo de Cimento	**Características do concreto**			**Condições ambientais**		**Condições de exposição da estrutura**	
	Cimento	f_c	**Adição**	CO_2	**UR**	**Proteção à chuva**	k_{ce}
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{co2}	k_{UR}		
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300	Ambiente interno Protegido da chuva	1,30
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300		
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100	Ambiente externo Protegido da chuva	1,00
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300		
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300	Ambiente externo Desprotegido da chuva	0,65
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	100		
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300		

Para verificar a influência da espessura de cobrimento (d_c) na vida útil assume-se que $x_{ec}(t) = d_c$, invertendo-se a equação, na qual o tempo (t) passa a ser a variável de resposta, representando a vida útil da estrutura.

Desta forma, algumas considerações entre diferentes tipos de modelos devem ser realizadas:

- Os modelos teóricos não consideram explicitamente os efeitos de algumas variáveis (umidade relativa, temperatura, tipo de cimento, condições de exposição, entre outras), enquanto os modelos apresentados consideram;

- No caso da penetração de cloretos, a maioria dos modelos teóricos consideram que o tipo de cimento, a resistência à compressão aos 28 dias, o tipo e o teor de adição estão diretamente relacionados com o coeficiente

de difusão, enquanto o modelo desenvolvido estima o coeficiente de difusão por meio dessas mesmas variáveis;

- O efeito do crescimento da concentração superficial de cloretos é desconsiderado na maioria das formulações, enquanto no modelo desenvolvido para cloretos (Equação 2) tal fenômeno é levado em conta implicitamente na variação do tempo;
- Os modelos resultantes são simples de serem aplicados na atividade de projeto das estruturas, cujos dados de entrada podem ser obtidos facilmente;
- As demais formulações encontradas na literatura envolvem uma maior complexidade matemática no momento da sua resolução (emprego de funções de erro, adoção de hipóteses simplificadas referentes a alguns fenômenos físico-químicos e obtenção de constantes que dependem de ajustes experimentais). Tais dados e/ou ferramentas nem sempre estão à disposição do engenheiro responsável pelo projeto das estruturas de concreto, exigindo a presença de um profissional especializado no momento da previsão da vida útil das estruturas.

Etapa 3: Simulação da Degradação

A partir de um modelo matemático, faz-se a simulação da degradação (etapa 3), a qual pode ser conduzida por processos probabilísticos[28], semiprobabilísticos[29] ou determinístico[30], independente de como o modelo foi gerado. Nos dois primeiros casos, faz-se necessário o conhecimento da média (μ), do desvio padrão (σ) ou coeficiente de variação (CV) e da distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias consideradas, e, em função de uma probabilidade de ocorrência, estima-se a vida útil da estrutura. Nessa abordagem, as incertezas do processo são inseridas na simulação; já na determinística são considerados os valores médios das variáveis de entrada, o que conduz a uma média da degradação da estrutura. Na Figura 3, essas abordagens são representadas graficamente.

28. Considera a distribuição conjunta de todas as variáveis de influência no processo de degradação.
29. Considera, de foram parcial, as variáveis de influência, através de seus valores médios.
30. Não considera a variabilidade dos fatores de influência no processo de degradação.

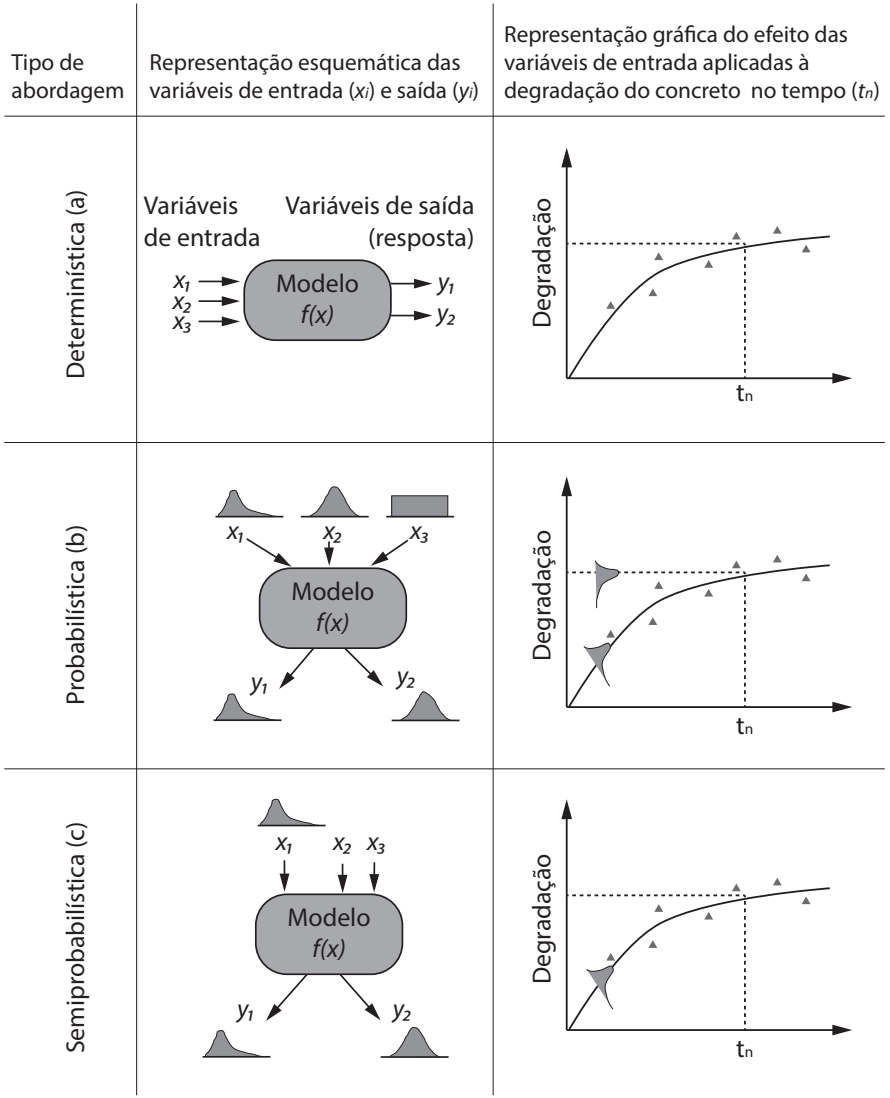


Figura 3. Abordagens para previsão de vida útil (POSSAN, 2010).

Na estimativa de vida útil por meios determinísticos, a variabilidade do processo de degradação não é considerada. A partir de valores médios das variáveis de entrada, os modelos fornecem como resposta valores médios[31] da degradação (profundidade de carbonatação ou de penetração de cloretos) ou do desempenho (espessura de cobrimento, vida útil). Em muitas situações, as informações advindas dos modelos determinísticos são insuficientes,

31. Há casos em que, em vez da média, adota-se um percentil inferior ou superior.

especialmente quando se deseja avaliar o risco de um projeto alcançar ou não determinado período de vida útil.

Dado que as estimativas de vida útil por meios determinísticos não são associadas a uma probabilidade de ocorrência ou de não ser atingida, Lorenzini (2006) destaca que a vida útil de uma estrutura só pode ser definida em termos probabilísticos, uma vez que esses tipos de dados conseguem inserir nos modelos de comportamento as variabilidades do processo de degradação das estruturas, fornecendo estimativas mais próximas à realidade. Há mais de duas décadas, os métodos probabilisticos para predição de vida útil de estruturas de concreto vêm sendo explorados, destacando os esforços de Siemes et al. (1985), Da Silva (1998), Frangopol (1997), Noortwijk e Frangopol (2004), Andrade (2001), entre outros. Verifica-se que a análise de confiabilidade[32] é a abordagem probabilística predominante, todavia outros processos estocásticos, como Cadeias de Markov (POSSAN; ANDRADE, 2014), Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy, também vêm sendo empregados para esse fim.

Dado que as normas brasileiras não fornecem modelos de previsão para estimativa da vida útil das estruturas de concreto mas, ao mesmo tempo, exigem uma vida útil mínima de projeto de 50 anos, acredita-se ser um passo inicial importante dispor de modelos de simples aplicação que possam simular a degradação, mesmo que de forma determinística, até que se tenha conhecimento suficiente das variabilidades relacionadas às propriedades dos materiais, aos cobrimentos da armadura obtidos em obra, à carga ambiental, entre outros parâmetros, considerando a realidade nacional.

Etapa 4: Tomada de Decisão

A análise do custo ciclo de vida (CCV) é uma técnica de avaliação de desempenho econômico e se dá por meio de soluções de equações diretas e simples, convertendo os custos relevantes do objeto de estudo em valor presente equivalente. Assim, para as estruturas de concreto, a análise do

32. Do ponto de vista de engenharia, confiabilidade é uma medida probabilística da segurança de um sistema – no caso, o sistema seria uma edificação – (ANG e TANG, 1984, p. 01). Em suma, a confiabilidade é uma ferramenta matemática que permite considerar as incertezas do processo de degradação inerentes às estruturas de concreto armado. Para tal, faz uso das suas distribuições de probabilidades, fornecendo a probabilidade de falha da estrutura no tempo.

CCV é apropriada para a comparação de alternativas de projeto, nas quais os investimentos iniciais são ponderados em relação às ações de operação, manutenção, reparo e reabilitação para um período de tempo pré-determinado. Nesse caso, a alternativa com o menor custo irá representar a aproximação mais econômica. Em plantas de altos investimentos, as incertezas do processo são consideradas probabilisticamente, por meio da análise de sensibilidade e de riscos, conferindo maior confiabilidade aos resultados.

5. Aferição dos Modelos de Degradação Propostos por Andrade (2001) e Possan (2010)

Uma vez selecionados os modelos propostos por Andrade (2001) e Possan (2010) por serem de fácil aplicação para utilização pela indústria da construção civil, e considerando que eles apresentam grande semelhança com os diversos modelos existentes na literatura e com alguns dados de obras e ensaios em ambientes naturais, foram geradas novas informações, a partir de um levantamento das lacunas existentes, que contemplassem os diversos materiais e ambientes existentes no Brasil, por meio da execução de ensaios acelerados e ensaios naturais.

Para tal, foram moldados corpos de prova de concreto e de argamassa em Porto Alegre e remetidos para diversas capitais: Belém, Fortaleza, Goiânia, Vitória e São Paulo. As Tabelas 8 e 9 apresentam o número de corpos de prova confeccionados para cada tratamento (combinação de variáveis independentes) dos concretos e argamassas utilizados, respectivamente.

Tabela 8. Variáveis independentes para execução dos corpos de prova de concreto.

Número de corpos de prova de concreto – 10 × 10 × 36 (cm)				
Cimento	**Relação água/cimento**			
	0,45	**0,55**	**0,65**	
CPII-F	21	21	21	
CPIII	21	21	21	
CPIV	21	21	21	
CPV	21	21	21	Total
Traço	Rico	Interm.	Pobre	252 CPs

Tabela 9. Variáveis independentes para execução dos corpos de prova de argamassa.

Número de corpos de prova de argamassa – 7 × 7 × 28 (cm)				
Cimento	**Traço**			
	Rico	**Intermediário**	**Pobre**	
CPII-F	21	21	21	
CPIII	21	21	21	
CPIV	21	21	21	
CPV	21	21	21	Total
Traço	Rico	Interm.	Pobre	252 CPs

A Figura 4 mostra os corpos de prova embalados para remessa aos locais de exposição. Esse procedimento garantiu que todas as amostras fossem realizadas com os mesmos materiais, mesma metodologia e mesma mão de obra, reduzindo possíveis variabilidades não desejadas. Uma vez entregues ao destino final, os corpos de prova foram expostos, todos com a mesma idade, ao ambiente natural (externo protegido da chuva e externo desprotegido da chuva). Em Porto Alegre, além da exposição ao ambiente natural, um conjunto de corpos de prova foi levado à câmara de carbonatação com concentração de 2% de CO_2, de forma a acelerar o ensaio e correlacionar os resultados com os dos ensaios naturais.

Em idades pré-estabelecidas, foram feitas medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos (somente para Vitória e Fortaleza).



Figura 4. Corpos de prova produzidos em Porto Alegre para remessa aos locais de exposição, com o objetivo de aferir os modelos de previsão da vida útil de estruturas para a realidade brasileira.

De posse dos resultados de todos os ensaios, os dois modelos de previsão (ANDRADE, 2001; POSSAN, 2010) serão aferidos, de forma a garantir que os mesmos possam ser generalizados para o Brasil como um todo.

6. Previsão de Vida Útil para Sistemas Estruturais em Concreto

Sabe-se que existem vários agentes que podem levar à degradação de uma estrutura de concreto armado (reação álcali-agregado, ataque químico, entre outros). Todavia, vários levantamentos realizados no Brasil e no exterior mostram que a corrosão das armaduras é a forma de degradação mais frequente nas estruturas.

A corrosão é iniciada por dois agentes: os íons cloreto (Cl^-), presente nas áreas salinas e industriais, e o CO_2, predominantemente presente nos grandes conglomerados urbanos. Sendo assim, há um esforço da comunidade técnico-científica em se tentar modelar matematicamente a penetração desses agentes através da rede de poros do concreto, visando a prever o tempo entre a colocação da estrutura em serviço e a despassivação da armadura, correspondente ao período de vida útil de projeto (VUP).

Desta forma, serão apresentados na sequência dois exemplos hipotéticos visando a estimar a vida útil de projeto de uma estrutura, utilizando os modelos propostos nesta pesquisa, para que se possa perceber a influência da variabilidade dos parâmetros de entrada no resultado da simulação.

6.1. Exemplo para Estrutura Sujeita à Ação de Cloretos

Neste caso, será apresentado um exemplo de como estimar a vida útil de projeto (VUP) de uma estrutura de concreto armado quando inserida em um ambiente marinho.

1º Passo: Informações Sobre a Estrutura e o Ambiente de Exposição

Os dados referentes à estrutura e ao ambiente de exposição são apresentados na Tabela 10. Visando a atingir uma vida útil mínima de projeto (VUP) de 50 anos, serão simulados diversos cenários, variando a resistência do concreto, a espessura de cobrimento, entre outros fatores, para que se possa comparar os efeitos dessas variáveis e de suas variabilidades na vida útil da edificação.

Tabela 10. Dados do ambiente de exposição e da estrutura de concreto.

Dados necessários para as simulações	
Variável/fatores	**Média**
f_{C28}(MPa)	40
Cobrimento (mm)	40
Temperatura média (ºC)	25
Umidade relativa (%)	70
Tipo de cimento	CP IV
Teor ambiental de cloretos (%)	1,5

2º Passo: Escolha do Modelo de Degradação e Determinação da Vida Útil

A simulação determinística é mais simplista, basta inserir as variáveis da Tabela 6 no modelo de degradação devido à ação dos íons cloreto (Equação 2), conforme mostrado na Equação 4.

$$t = \left\{ \frac{40}{\left[\frac{7{,}35 \cdot 70^{0{,}7} \cdot 25^{0{,}1} \cdot 1{,}5^{0{,}7}}{1{,}17 \cdot 40 \cdot 1 \cdot (1+0)^{0{,}2}} \right]} \right\}^2 = 50 \text{ anos} \qquad \text{Equação 4}$$

Desta forma, verifica-se que para garantir uma vida útil de 50 anos em um ambiente marinho, a estrutura terá que ter uma espessura de cobrimento de projeto igual a 40 mm e ser construída com um concreto de 40 MPa de resistência à compressão, com o uso do cimento Portland pozolânico (CP IV). Considerando a impossibilidade de alteração das condições ambientais (temperatura, teor de cloretos no ambiente e umidade relativa), a espessura de cobrimento e a resistência do concreto são as duas únicas variáveis que podem ser especificadas no projeto da estrutura, visando à obtenção da vida útil de requerida.

Todavia, sabe-se que em qualquer processo produtivo há a presença de variações dos parâmetros, que está diretamente associada ao controle e à garantia da qualidade de execução. Sendo assim, a consideração dos efeitos dessas variações é de suma importância, pois pode causar alterações significativas na vida útil calculada, conforme será apresentado no item a seguir.

3ª Passo: Influência da Variabilidade dos Parâmetros na Penetração de Cloretos

Pode-se observar nas Tabelas 11 e 12 o impacto de variações da espessura de cobrimento e da resistência do concreto, em separado, na vida útil de projeto, estimada a partir do modelo de degradação devido à ação dos íons cloreto (Equação 2), para estruturas inseridas em ambiente marinho. Para tanto, foram adotados diferentes valores para o desvio-padrão de cada variável, verificando a alteração no valor da VUP (valor médio e desvio-padrão).

Tabela 11. Impacto das variações da espessura de cobrimento na vida útil de projeto.

Espessura de cobrimento (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coeficiente de variação	Resistência (MPa)	VUP (anos)	Desvio-padrão (anos)	Coeficiente de variação
40	-	-	40	50	-	-
40	10	25%	40	54	28	52%
40	20	50%	40	63	72	114%
40	30	75%	40	79	149	189%
40	40	100%	40	99	271	274%

Considerando uma situação de controle de qualidade perfeito durante a execução de uma estrutura, a sua vida útil de projeto seria satisfatória (50 anos) com as especificações relacionadas à espessura de cobrimento (40 mm) e à resistência do concreto (40 MPa). Todavia, alguns trabalhos desenvolvidos durante este projeto mostram que há uma grande variabilidade tanto na espessura de cobrimento praticada em obra (SILVA, 2012; CAMPOS, 2013; MENNA BARRETO, 2014; MARAN, 2015) quanto na resistência do concreto (MASCOLO, 2012). Sendo assim, o impacto das variações desses parâmetros mostram as grandes alterações no que se refere à previsão da vida útil das estruturas. Por exemplo, para um cobrimento especificado de 40 mm, com desvio-padrão em obra de 10 mm, a estimativa de vida útil seria de 54 ± 28 anos. Já para um desvio-padrão de 20 mm, a estimativa de vida útil seria de 63 ± 72 anos.

Considerando a resistência do concreto (Tabela 12), tem-se que coeficientes de variação da ordem de 13% podem acarretar alterações de até 25% na previsão da vida útil de projeto. Ou seja: há uma probabilidade significativa de que os 50 anos previstos em projeto não sejam atendidos, caso não sejam criados mecanismos de controle efetivos de execução das obras.

Tabela 12. Impacto das variações da resistência do concreto na vida útil de projeto.

Espessura de cobrimento (mm)	Resistência (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coeficiente de variação	VUP (anos)	Desvio-padrão (anos)	Coeficiente de variação
40	40	2	5%	51	5	10%
40	40	5	13%	51	13	25%
40	40	10	25%	54	26	48%
40	40	15	38%	58	39	68%
40	40	20	50%	63	54	85%

6.2. Exemplo para Estrutura Sujeita à Ação do CO_2

No exemplo a seguir, será conduzida a previsão de vida útil de uma estrutura de concreto nova, quando inserida em um ambiente urbano, empregando-se a abordagem determinística.

1º Passo: Informações Sobre a Estrutura e o Ambiente de Exposição

Visando a atingir uma vida útil mínima de projeto (VUP) de 50 anos, conforme dados referentes à estrutura e ao ambiente de exposição da Tabela 13, serão simulados diversos cenários, variando a resistência do concreto, espessura de cobrimento, entre outros fatores, para que se possa comparar os efeitos destas variáveis e de suas variabilidades na vida útil da edificação.

Tabela 13. Informações do concreto e do ambiente de exposição usadas nas simulações.

Dados necessários para as simulações	
Variável/fatores	**Média**
f_{C28}(MPa)	20, 30, 40 e 50
Cobrimento (mm)	20, 30, 40
Teor de CO_2 (%)	0,038
Umidade relativa - UR(%)	60
Tipo de cimento	CP IV
	CP V ARI
Ambiente de exposição	Externo Protegido da chuva (EP)

2º Passo: Escolha do Modelo de Degradação e Determinação da Vida Útil

A simulação determinística é mais simplista, para um tempo (t) de 50 anos basta substituir as variáveis da Tabela 13 (Cimento = CP IV, f_c = 40 MPa, CO_2 = 0,038%, ambiente de exposição = EP, UR = 60%) no modelo de degradação devido à ação do CO_2 (equação 3), conforme apresentado na Equação 5.

$$X_{ec}(t) = 33,27 * \left(\frac{20}{40}\right)^{1,7} * \left(\frac{50}{40}\right)^{0,5} \exp\left[\left(\frac{0,32 * 0^{\frac{3}{2}}}{40+40}\right) + \left(\frac{15,5 * 0,038^{0,5}}{60+40}\right) - \left(\frac{100 * (0,60-0,58)^2}{100+40}\right)\right] * 1$$

$$X_{ec}(50) = 16,6\text{mm}$$

Equação 5

Uma estrutura construída com essas características, em 50 anos, apresenta espessura de carbonatação de 16,6 mm. Porém, se a resistência do concreto for reduzida para 30 e 20 MPa, a profundidade de carbonatação do concreto passa a ser, respectivamente, de 27,2 mm e 54,3 mm. Se a espessura de cobrimento da armadura dessa estrutura fosse de 25 mm, apenas no primeiro caso a VUP seria garantida em 50 anos. Isso denota a importância da modelagem matemática para a especificação do projeto visando à durabilidade, com a qual o projetista poderá simular diferentes cenários a fim de escolher a melhor alternativa do ponto de vista técnico e econômico.

3ª Passo: Influência da Variabilidade dos Parâmetros na Profundidade de Carbonatação

O impacto da variação da espessura de cobrimento e da resistência do concreto na vida útil de uma estrutura de concreto sujeita à ação do CO_2, considerando o desvio padrão e o coeficiente de variação dos fatores que influenciam na VUP, é apresentado nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. As simulações foram conduzidas de forma probabilística, empregando-se o modelo de degradação devido à ação do CO_2 (equação 3).

Tabela 14. Impacto das variações da espessura de cobrimento na VUP de estruturas sujeitas à ação do CO_2.

d (mm)	σ(mm)	CV	fc (MPa)	VUP		
				Média (anos)	σ (anos)	CV
40	-	-	25	57,5	-	-
40	10	25%	25	58,9	20,6	35%
40	20	50%	25	76,7	41,2	54%
40	30	75%	25	71,4	82,4	83%
40	40	100%	25	78,7	74,1	95%

d = espessura de cobrimento; fc = resistência à compressão; CV = coeficiente de variação; σ = desvio padrão.

Tabela 15. Impacto das variações da resistência do concreto na VUP de estruturas sujeitas à ação do CO_2.

d (mm)	fc (MPa)	σ(MPa)	CV	VUP		
				Média (anos)	σ (anos)	CV
40	25	2	5%	50,1	11,1	23%
40	25	3	13%	52,3	18,3	35%
40	25	5	25%	55,9	27,7	49%
40	25	10	38%	74,1	62,1	84%
40	25	12,5	50%	86,8	83,8	97%

d = espessura de cobrimento; fc = resistência à compressão; CV = coeficiente de variação; σ = desvio padrão.

Nota-se, na Tabela 14, que coeficientes de variação da ordem de 25% para a espessura de cobrimento (d = 40 ± 10 mm) podem acarretar alterações de até 35% na previsão da vida útil de projeto, já um coeficiente de variação de 13% da resistência à compressão do concreto (fc = 25 ± 3 MPa) pode gerar variações de 35% na vida útil (Tabela 15). Nos dois casos, se a variação for negativa (ou seja, se houver redução da espessura do cobrimento ou da resistência à compressão do concreto), a VUP não será atendida (será inferior a 50 anos). Logo, o controle de qualidade da execução das estruturas e da produção do concreto são fundamentais para que a vida útil de projeto seja atendida.

7. Variabilidades Existentes no Processo de Produção das Estruturas

Conforme comentado nas seções precedentes, a estimativa da vida útil de uma estrutura em concreto é incerta devido às variações de geometria, características dos materiais, modo de execução e meio ambiente. Essas variações precisam ser conhecidas para que seja possível prever a vida útil de uma estrutura de forma probabilística. No Brasil, existem poucos dados disponíveis com relação a estas variabilidades. Desta forma, nesta pesquisa buscou-se levantar duas fontes importantes de variabilidade que vão refletir diretamente na vida útil das estruturas (como demonstrado no item 7) e que podem ser minimizadas a partir de procedimentos de controle durante a execução das mesmas: cobrimento de concreto das armaduras e resistência à compressão do concreto.

7.1. Variabilidade do Cobrimento das Armaduras

A espessura da camada de cobrimento das armaduras é uma variável que exerce uma influência importante na vida útil das estruturas de concreto. Por não ser uma variável bem controlada durante o desenvolvimento de uma obra, a alta variabilidade dos valores de cobrimento influencia negativamente na qualidade final das estruturas.

Devido à pouca disponibilidade de estudos brasileiros que estabeleçam as diferenças existentes entre os valores de cobrimento de armadura especificados em projeto e o valor real obtido em obra, antes e após a concretagem, neste projeto foram realizados levantamentos por quatro pesquisadores distintos em obras localizadas em Porto Alegre e em Cuiabá, buscando correlações entre as variabilidades do cobrimento e a qualidade do controle de execução, o tipo de elemento estrutural e o porte das empresas (SILVA, 2012; CAMPOS, 2013; MENNA BARRETO, 2014; MARAN, 2015). As Figuras 5 e 6 e as Tabelas 16 e 17 mostram alguns dos resultados obtidos.

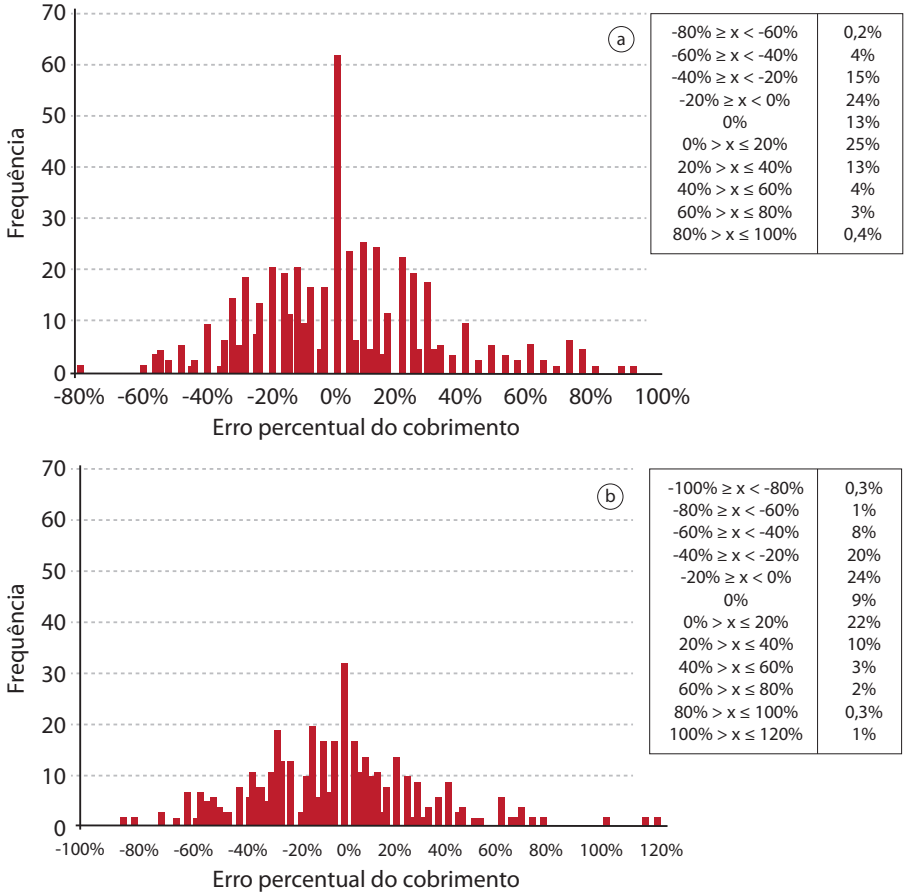


Figura 5. Histograma geral do erro percentual do cobrimento medido em 7 obras em Porto Alegre, antes da concretagem, em relação ao especificado em projeto para (a) 4 obras com elevado controle de qualidade (todas com certificação de qualidade) e (b) 3 obras com baixo controle de qualidade (SILVA, 2012).

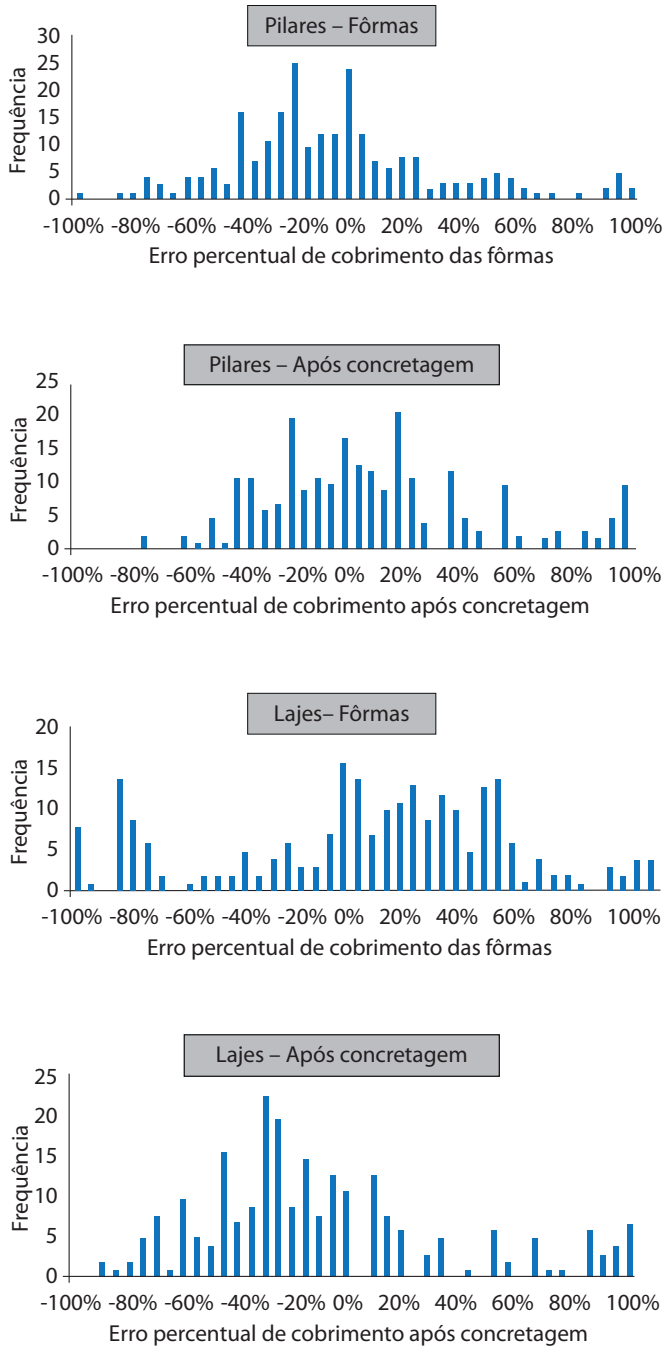


Figura 6. Histogramas gerais do erro percentual do cobrimento medido em 8 obras em Porto Alegre, antes e após a concretagem, em relação ao especificado em projeto (CAMPOS, 2013).

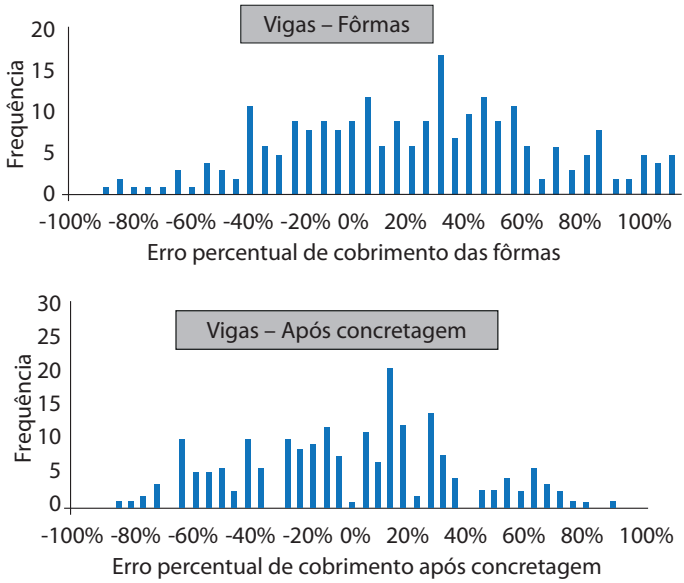


Figura 6. Continuação.

Tabela 16. Valores mínimos e máximos, em mm, dos cobrimentos executados medidos em obra após concretagem (MENNA BARRETO, 2014).

Cidade	Empresa	Obra	Elemento Estrutural							
			Laje		Viga				Pilar	
					Laterais		Fundo			
			Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín	Valor Max.
Cuiabá	A	1	4,0	23,0	16,0	49,0	11,0	28,0	5,0	63,0
		2	5,0	19,0	9,0	43,0	2,0	13,0	5,0	66,0
		3	3,0	22,0	8,0	58,0	5,0	23,0	5,0	60,0
	B	4	9,0	20,0	14,0	44,0	5,0	25,0	5,0	51,0
Porto Alegre	C	5	5,0	17,0	3,0	42,0	3,0	17,0	4,0	60,0
		6	5,0	27,0	6,0	43,0	3,0	27,0	5,0	40,0
		7	2,0	18,0	4,0	48,0	5,0	31,0	3,0	60,0
	D	8	8,0	25,0	12,0	46,0	3,0	20,0	5,0	45,0
		9	2,0	23,0	6,0	48,0	6,0	24,0	3,0	41,0

Medidas do cobrimento em mm.

Tabela 17. Resumo dos cobrimentos executados medidos em obra após concretagem (MARAN, 2015).

Cidade	Empresa	Obra	Elemento Estrutural											
			Laje			Viga						Pilar		
						Laterais			Fundo					
			Média (mm)	Desvio-padrão	Coef. de variação	Média (mm)	Desvio-padrão	Coef. de variação	Média (mm)	Desvio-padrão	Coef. de variação	Média (mm)	Desvio-padrão	Coef. de variação
Cuiabá	A	1	15,4	5,5	0,36	31,0	9,3	0,30	17,4	4,2	0,24	32,0	12,3	0,39
		2	13,2	4,3	0,32	23,4	8,0	0,34	7,5	2,7	0,37	24,8	12,0	0,49
		3	14,2	4,8	0,34	31,5	13,4	0,42	13,9	5,5	0,39	29,1	13,1	0,45
	B	4	15,6	2,7	0,17	27,9	7,0	0,25	11,8	4,5	0,38	23,1	9,3	0,40
Porto Alegre	C	5	10,9	3,4	0,31	19,8	8,9	0,45	10,3	3,9	0,38	25,1	9,8	0,39
		6	15,3	6,0	0,39	22,1	11,0	0,50	10,5	5,1	0,49	22,3	9,2	0,41
		7	9,9	4,5	0,45	26,7	12,6	0,47	19,2	6,8	0,35	26,6	14,3	0,54
	D	8	15,7	4,6	0,29	24,7	7,7	0,31	11,8	4,2	0,36	24,0	9,0	0,37
		9	16,3	4,6	0,28	26,2	9,8	0,37	15,4	4,6	0,30	22,8	9,1	0,40

Nível de execução médio

Nível de execução baixo (segundo Andrade, 2001)

Como se pode observar, todos os dados levantados apontam para uma elevada variabilidade dos cobrimentos executados, independentemente do tipo de elemento estrutural ou do tipo de controle executado.

7.2. Variabilidade da Resistência do Concreto à Compressão

Outro parâmetro de relevância que interfere na vida útil de uma estrutura é a especificação e garantia da resistência do concreto à compressão. Para ampliar a base de dados das variações que ocorrem na resistência do concreto em relação à resistência característica especificada, neste projeto realizaram-se coletas de amostras em obras da cidade de Porto Alegre (MASCOLO, 2012). Os principais resultados encontrados são apresentados nas Figuras 7 e 8.

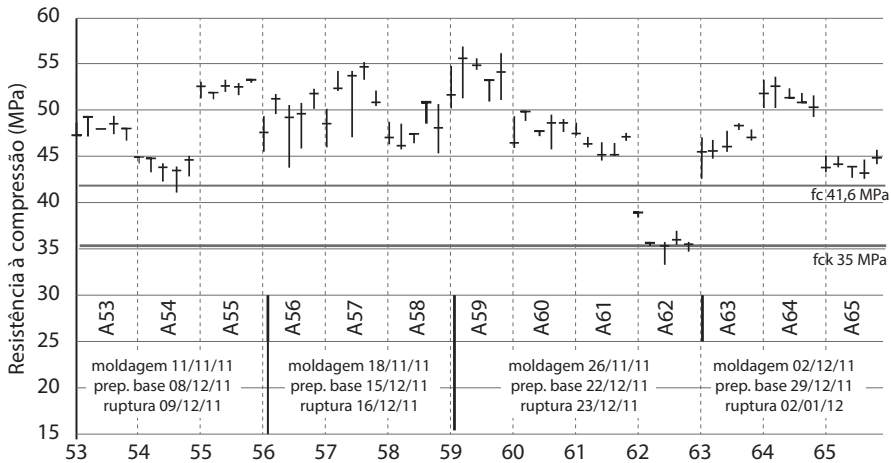


Figura 7. Resistência à compressão dos corpos de prova da obra A, onde cada linha de pontos representa o resultado de três corpos de prova que compõem os exemplares de cada lote (MASCOLO, 2012).

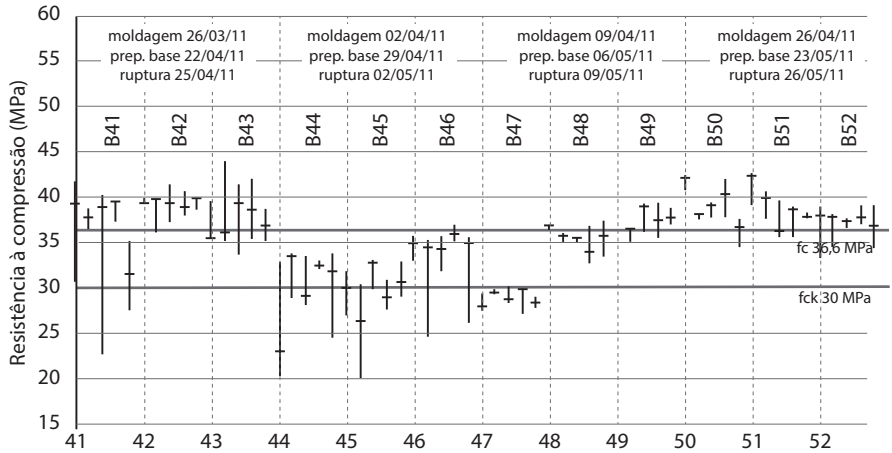


Figura 8. Resistência à compressão dos corpos de prova da obra B, onde cada linha de pontos representa o resultado de três corpos de prova que compõem os exemplares de cada lote (MASCOLO, 2012)

Na Figura 7, o lote com valor médio menor atingiu 36,7 MPa (A62), enquanto o maior 55,3 MPa (A59), o que representa uma amplitude de 18,6 MPa. Avaliando os resultados da obra B (Figura 8), percebe-se uma menor amplitude, 11,8 MPa, entre o valor mínimo, 29,5 MPa (B47), e máximo, 41,3 MPa (B43), de resistência média dos lotes, quando comparados aos resultados da obra A.

Para tentar justificar o motivo das variações encontradas nas resistências dos concretos, buscaram-se dados relativos à variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012 (GIRARDI, 2014). Os resultados encontrados para o cimento CPIV, de elevado consumo no estado, constam nas Figuras 9 a 11.

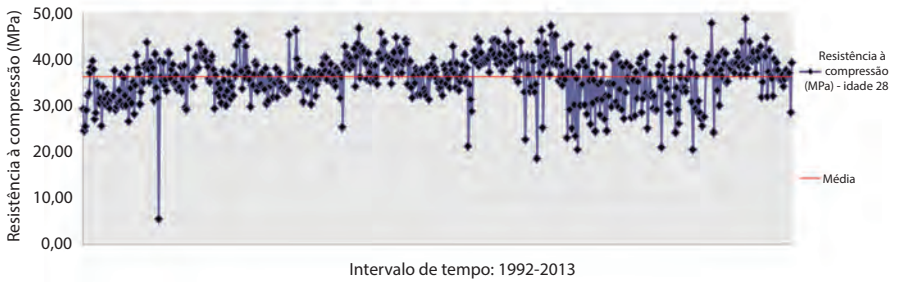


Figura 9. Variação da resistência à compressão do cimento CPIV, marca A, ao longo do tempo (GIRARDI, 2014).

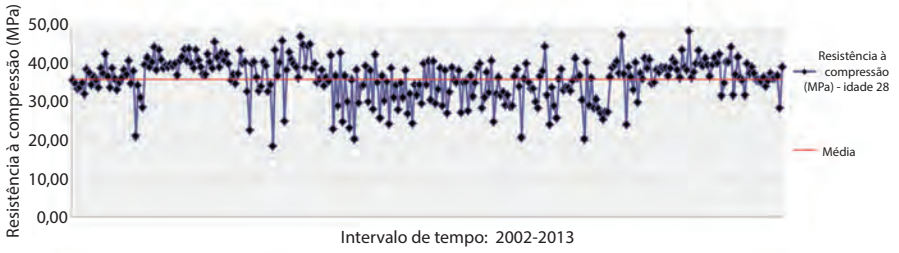


Figura 10. Variação da resistência à compressão do cimento CPIV, marca B, ao longo do tempo (GIRARDI, 2014).



Figura 11. Variação da resistência à compressão do cimento CPIV, marca C, ao longo do tempo (GIRARDI, 2014).

Para o cimento marca A (Figura 9), a média da resistência no período analisado foi de 36,16 MPa, com desvio padrão de 4,89 MPa e coeficiente de variação de 14%. Para o cimento B (Figura 10), a média ficou em 36,21, com desvio de 5,35 MPa e coeficiente de variação de 15%. Esses valores foram de 37,83; 6,70 e 18% para o cimento C (Figura 11). Nota-se, portanto, que boa parte da variabilidade do concreto pode ser justificada pela variabilidade do cimento.

8. Considerações Finais

A previsão de vida útil é um problema complexo, uma vez que as estruturas de concreto, com seus componentes e sistemas, deterioram-se em diferentes taxas, existindo várias incertezas relacionadas às propriedades dos materiais, aos mecanismos de degradação, à resposta estrutural, à carga ambiental e às condições de uso, manutenção e operação, entre outros. Em razão dessas incertezas, os avanços nos estudos de predição de vida útil dessas estruturas estão fortemente relacionados à modelagem adequada da degradação do concreto, tanto determinista quanto probabilisticamente.

Dado que as normas brasileiras não fornecem modelos de previsão para estimativa da vida útil das estruturas de concreto mas, ao mesmo tempo, exigem uma vida útil mínima de projeto de 50 anos, acredita-se ser um passo inicial importante dispor de modelos de simples aplicação que possam simular a degradação, mesmo que de forma determinística, até que se tenha conhecimento suficiente das variabilidades envolvidas para a realidade nacional.

A precisa determinação da vida útil das estruturas de concreto pode ser uma tarefa um tanto difícil de ser realizada. Contudo, desde que se tenha ciência dos vários fatores compreendidos na sua estimativa, não é uma tarefa inexequível, sendo que previsões que incorporam o acaso, as quais consideram certa probabilidade de algo ocorrer, podem revelar resultados satisfatórios.

Planilhas eletrônicas podem ser facilmente utilizadas para este fim, até mesmo para simulações mais complexas, como as probabilísticas, tal como exemplificada na Figura 12, que apresenta uma interface amigável idealizada como forma de facilitar a utilização dos modelos propostos.

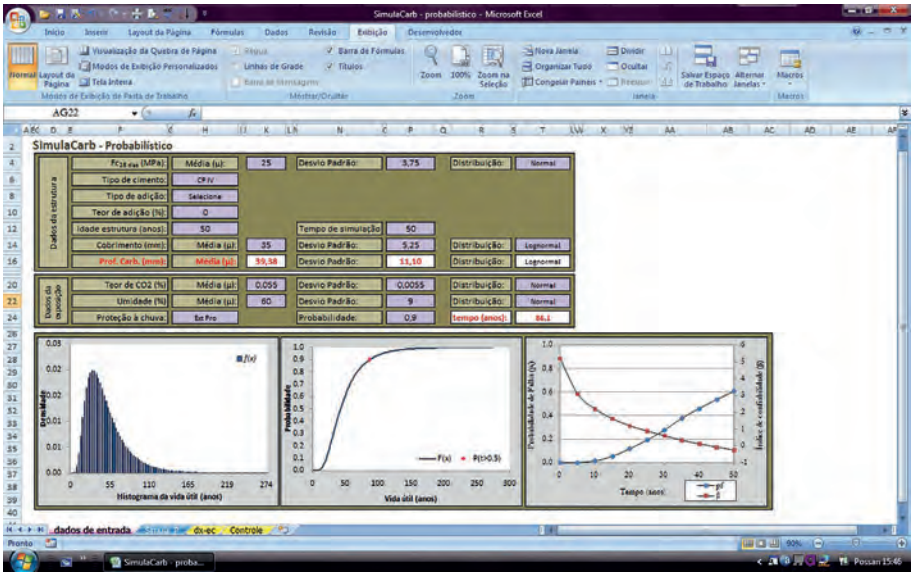


Figura 12. Tela de simulação para a previsão de vida útil de estruturas de concreto onde os dados de entrada são preenchidos nas células lilás e os de saída da simulação aparecem nas células brancas.

Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 201*: guide to durable concrete. ACI manual of concrete practice, Detroit, 1992, part 1, 39p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 365*: service-life prediction: state-of-the-art report. Detroit, 2000, 44p.

ANDRADE J. J. O. Análise de danos em estruturas de concreto armado: influência do controle de qualidade de execução através de uma análise probabilística. In: VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2003. Mérida, Yucatán, México: Alconpat, 2011. v. 2.

ANDRADE, J. J. O. *Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras*: iniciação por cloretos. 2001, 256f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANG, A.; TANG, W. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*: Decision, Risk and Reliability. v. 2, Ed. John Wiley and Sons, 1984. 562p.

ASIAN CONCRETE MODEL CODE – ACMC. *International Committee on Concrete Model Code for Ásia*, 2006. Disponível em: <http://www.iccmc.org/index.htm>. Acesso em: 5 mar. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 NB1: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 1968, rev. abr, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8681*: Ações e segurança nas estruturas: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004, 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577*: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14037*: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações: Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos, 2011, 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10787*: Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5674*: Manutenção de edificações: Requisitos para o sistema de gestão de manutenção, 2012, 25p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575* - Partes 1-6**:** Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NRB 12655*: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

BAROGHEL-BOUNY V. Durability Indicators: A Basic Tool for Performance – Based Evaluation and Prediction of Durability. In: Proceedings of International Seminar on Durability and Lifetime Evaluation of Concrete Structures', Higashi-Hiroshima, September, 2004.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BS 7543:* Guide to Durability of Buildings and Building Element, Products and Components. London, 2003.

BUST, A. G.; GIBB, F.; HASLAM, R.A. Manual handling of highwaykerbs: focus group findings. *Applied Ergonomics*, n. 36, p. 417-425, 2005.

CAMPOS, D. de. *Cobrimento de armadura em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre valores antes, durante e depois da concretagem***.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. *Desempenho de edificações habitacionais*: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013, 308p. Disponível em <http://www.cbic.org.br/arquivos/guia_livro/Guia_CBIC_Norma_Desempenho_2_edicao.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 183: durable concrete structures. *Bulletin d' Information*, Suecis, n. 183, may 1992, 112p.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 238: new approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. *Bulletin d' Information*, Suecis, n. 238, may 1997, 138p.

CYTED. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano d Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV. Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales. 2. ed., 1998.

DA SILVA,T. J. *Predicción de la Vida Útil de Forjados Unidireccionales de Hormigón Mediante Modelos Matemáticos de Deterioro*. 1998. 290 f. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. ETSCCP. Barcelona, 1998

DARTS, Durable And Reliable Tunnel Structures. Research project. Framework, 2003. Disponível em: <www.dartsproject.net>.

DURACON. *Influência da ação do meio ambiente na durabilidade do concreto*: Projeto Duracon, Brasil. Pesquisador responsável Maryangela Geimba de Lima. Relatório de reunião anual, outubro, 2004.

DURACRETE, *General Guidelines for Durability Design and Redesign*. The European Union-Brite-EuRam III, Project No. BE 95-1347, "Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures", Report No. T 7-01-1, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROCODE 2. Design of concrete structures: General rules and rules for buildings - *BS EN 1992-1-1:2004***.** British-Adopted European Standard, 23-Dec-2004, 230p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *FIB Bulletin 34*. Model Code for Service Life Design, February 2006.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *FIB Bulletin 53*. Model Code for Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance, Second edition. Volume 3: Design of durable concrete structures, 2010, p. 390.

FERREIRA, F. P. *Gestão de Facilities*: estudo exploratório da prática em empresas instaladas na região metropolitana de Porto Alegre. 2005. 151p.

FRANGOPOL, D. M. Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures. *Journal of Structural Engineering*, v. 123, n. 10, p. 1390-1401, 1997.

GIRARDI, R. *Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o Mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012.* Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HAMADA, M. Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OH CEMENT, 5, 1969. Tokyo. *Proceedings…* Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p. 343-369.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research,* v. 17, p. 489-504, 1987.

HYVERT, N. *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDZATION. Buildings and constructed assets - Service life planning: General principles. International Organization for Standardization - General principles and framework . *ISO 15686: Part 1***.** jun, 2011, 51p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDZATION. General Principles on the Design of Structures for Durability. *ISO 13823.* Geneva: ISO/TC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDZATION. General principles on reliability for structures. *ISO 2394***.** Geneva: ISO/TC, 1998.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 699-702, 2000.

LIFECON. Methodology and data for calculation of life cycle costs (LCC) of maintenance and repair methods and works. Deliverable 5.2. Author Minna Kesäläinen. (Project -CT-2000-00378, 2003).

LORENZINI, R. V. *Avaliação probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado*. Dissertação. 2006. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

MANGAT, P. S. Microestruture, Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Blended Cement Paste and Concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 16, p. 73-81, 1994.

MARAN, A. P. *Proposta de distribuição de espaçadores plásticos para garantir o cobrimento especificado em lajes de concreto armado***.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MASCOLO, R. *Concreto usinado: análise da variação da resistência à compressão e de propriedades físicas ao longo da descarga do caminhão betoneira***.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, IX, 2002, Foz do Iguaçu. *Anais...* Porto Alegre: 2002, p. 1425-1432.

MEJLBRO, L. The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. In: Durability of Concrete in Saline Environment. *Proceedings...* P. Sandberg (ed.) Lund, 1996, p. 127-158.

MENNA BARRETO, M. F. F. *Avaliação de desempenho de espaçadores plásticos: proposição e avanço de métodos de avaliação***.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

MORGAN, D. L. *Focus groups as qualitative research*. Qualitative research methods series v. 16. 2 ed. London: Sage Publications, 1997.

NGAB, A. S. The African concrete code (ACC). In: African Concrete Code symposium, 2005. Tripoli, Libya, nov 2005, 16p.

NOORTWIJK, J. M. V.; FRANGOPOL, D. M. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 19, p.345-359, 2004.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, n. 88, p. 363-373, 1991a.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, n. 88, p. 363-373, 1991b.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.;FARDIS, M. N. Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. *Journal of the American Institute of Chemical Engineers*, v. 35, n. 10, p.1639-1650, 1989.

POSSAN, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POSSAN, E. *Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

POSSAN, E; ANDRADE, J. J. O. Markov Chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life. *Materials Research*, v. 17, p. 593-602, 2014.

POSSAN, E., DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. *Revista Técnico-Científica CREA-PR*. v. 1, 2013.

POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O. Metodologia para a modelagem e previsão de vida útil de estruturas de concreto. In: XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y el XIII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2011, Antigua Guatemala. Mérida, Yucatán, México: Alconpat, 2011. v. 1.

RINCÓN, O, T.; DURACON Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an Iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment*, n. 41, 2006 p. 952-962.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 571-579, 2004.

SIEMES,T.et. al. *Durability***:** A Probabilistic Approach. Durability of Building Materials, n. 3, 1985, p. 101-113.

SILVA, O. S. P. *Cobrimento de armadura em estruturas de concreto armado: análise comparativa entre o valor especificado em projeto e o em execução em obras na cidade de Porto Alegre***.** 2012. Monografia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

THIÉRY, M. *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons*: Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

TUUTTI, K. *Corrosion of Steel in Concrete.* Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 30p.

UJI, K. et al. Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete. Ed. C. L. Page. *Proceedings...* London, p. 285-297, 1990.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C009

Comportamento Estrutural de Alvenarias Construídas com Blocos de Terra Compactados (BTC)

9

Givanildo Alves de Azeredo
Geilson Marques de Oliveira
José Diego Formiga Dantas
Francisco Eli Freire dos Santos
Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo
Gibson Rocha Meira

1. Introdução

A terra é provavelmente um dos materiais mais antigos usados na construção de edificações residenciais. Em várias partes do Brasil, pode-se encontrar inúmeras edificações cujo sistema construtivo teve a terra como seu principal material de construção. Geralmente, nessas construções, a terra era usada na fabricação de blocos, os quais, por sua vez, eram usados na construção de alvenarias. Segundo Heathcote (1995), as construções de terra antigas são patrimônios culturais e de valor artístico muito importante.

As edificações em terra podem ser construídas segundo diversos sistemas construtivos, quais sejam: paredes monolíticas, também conhecidas como taipa de pilão, alvenarias ou taipa. As paredes monolíticas costumam ter espessura bem superior às de alvenaria que, por sua vez, são construídas com adobes.

O adobe é um bloco de terra moldado e compactado à mão. Ele tanto pode ser queimado como pode ser utilizado cru. Dependendo das propriedades requeridas, pode-se escolher um ou outro tipo de fabricação. Fabricados com terra bastante argilosa, com teor de no mínimo 25% de argila, os adobes geralmente são estabilizados com cal ou com cimento, a depender da natureza da argila que constitui a terra. A estabilização oferecida pela cal ou

pelo cimento tem o objetivo de oferecer aos produtos fabricados com terra a resistência apropriada à água. Vale salientar que tanto a cal quanto o cimento, nesse caso, não exerce a função de ligante, pois a argila presente na terra já possui essa propriedade.

O teor de estabilizante dependerá da natureza e do teor da argila que constitui a terra. Um tijolo de adobe fabricado com uma argila do grupo esmectita exigirá quantidade muito maior de estabilizante se comparado a um tijolo fabricado com uma argila caulinítica, por exemplo. A montmorilonita, pertencente ao grupo da esmectita, possui alto poder expansivo. Em contato com a água, a adsorção por parte da argila influenciará na estabilidade dimensional do adobe. Sem a presença de um estabilizante, um adobe fabricado com uma argila montmorilonítica pode fissurar-se durante o processo de secagem. Isso acontece porque a montmorilonita adsorve água tanto na superfície externa como na superfície interna dos folhelhos, provocando o fenômeno da expansão. A caulinita, por sua vez, adsorve apenas na superfície externa dos folhelhos. Observa-se, então, a grande importância em se conhecer a terra que será utilizada nas construções.

Na fabricação de blocos, a escolha do cimento como estabilizante se dá principalmente devido ao fato de ele apresentar uma pega rápida, sobretudo nos momentos iniciais de manuseio dos adobes , que compreendem a desmoldagem, a secagem e a estocagem. Mesmo quando o estabilizante escolhido é a cal, aconselha-se o uso de percentuais mínimos de cimento, no intuito de facilitar a manipulação dos produtos fabricados. Na execução de alvenarias, entretanto, o ideal é sempre se utilizar uma argamassa com presença de cimento, com o propósito de não atrasar a produtividade. O emprego apenas de cal, cuja pega é demorada, poderia certamente provocar desalinhamentos ou desaprumos indesejados à alvenaria. O mesmo se pode dizer para a execução de fundações. Caso não se tenha cimento, sugere-se, então, o uso de algum material pozolânico de alta reatividade que, ao reagir com a cal, produzirá também, como resultado da reação, um material cimentício.

Guettala *et al.* (2006) indicaram que pelo menos 50% da população do mundo ainda vive em casas de terra. No entanto, a principal desvantagem da terra como um material de construção é a sua deterioração sob a ação das intempéries. Essa deterioração muitas vezes resulta em falha estrutural, daí a necessidade de estabilização.

Segundo Prompt e Borella (2010), a construção com terra teve seu uso largamente difundido no Brasil durante o período colonial. Em 1535, a igreja mais antiga do Brasil, dos Santos Cosme e Damião, foi erguida originalmente em taipa, na região metropolitana de Recife (SANTOS, 2015). A terra era usada na fabricação de adobes ou na construção de edificações de taipa. Os adobes eram queimados, na maioria das vezes, em fornos construídos artesanalmente pelo interior do país, os quais utilizavam madeira como combustível. No caso, eles se transformavam em tijolos cerâmicos maciços e adquiriam capacidade portante. No caso da taipa, a função estrutural é exercida pela madeira, sendo a terra utilizada para vedar os espaços vazios da estrutura.

Os blocos de terra compactada, também conhecidos como blocos de terra comprimida (BTC), são descendentes do adobe. Diferem-se, entretanto, pelo modo de fabricação: os adobes são moldados à mão, já os BTC são moldados em prensas mecânicas ou hidráulicas. A inovação tecnológica teve o intuito de aprimorar as antigas técnicas de construção em terra, notadamente o adobe seco ao sol. A prensa mecânica consegue produzir blocos densos, de forma regular e com maior resistência à água do que os simples adobes.

Desse modo, o surgimento dos BTC veio unir o tradicional ao moderno. Observa-se que essa nova técnica, ou seja, o uso de prensas mecânico-hidráulicas com energia de prensagem importante, surgiu com o avanço da tecnologia e da engenharia. Porém, o material usado é antigo, o que remete às construções coloniais tradicionais.

O tijolo de solo-cimento, em forma de adobe ou de BTC, constitui uma das alternativas para a construção de alvenaria. Esse elemento, após pequeno período de cura, garante resistência à compressão simples similar à dos tijolos cerâmicos, sendo a resistência tanto mais elevada quanto maior for a quantidade de cimento empregada.

Este capítulo apresenta conceitos e particularidades da terra como material de construção e, principalmente, resultados sobre o comportamento mecânico-estrutural de alvenarias de terra, constituídas de BTC.

2. Generalidades Sobre Estruturas de Terra

A avaliação do comportamento estrutural de sistemas construídos com BTC envolve o estudo sobre o processo de fabricação dos blocos de terra compactada (BTC) e, em seguida, a compreensão de como as cargas agem

nesse tipo de estrutura, no caso a alvenaria. O fato dos BTC apresentarem módulo de elasticidade mais baixo que os blocos cerâmicos e os de concreto faz com que, para uma dada tensão, as alvenarias de BTC se deformem mais.

O bloco com terra compactada (BTC) é uma forma moderna da aplicação da terra como material de construção. Na década de 50, foi concebida pelo pesquisador colombiano G. Ramires a primeira prensa manual, denominada de CINVA-RAM (BROWN *et al.*, 2014). Em seguida, surgiu a prensa Mattone e também várias outras prensas hidráulicas, como a brasileira Ecobrava, com energia de prensagem maior, além de menor esforço físico gasto na produção dos blocos.

Segundo Gonçalves (2005), faz-se necessária a construção das curvas granulométricas do solo. Por exemplo, a plasticidade do solo deve ser verificada por meio dos ensaios de Atterberg. O limite de liquidez deve se enquadrar de preferência no intervalo 40-45 %. De acordo com Barbosa e Ghavami (2007), quanto ao tipo de solo, admite-se que as proporções adequadas dos componentes do solo são: 10 a 20% de argila; 10 a 20% de silte e 50 a 70 % de areia. Para Pinto (1980), o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho, sendo mais indicados os solos arenosos bem graduados e com razoável quantidade de silte mais argila, uma vez que exigem baixo consumo de cimento. Já a *Portland Cement Association* (PCA, 1969) considera excelentes os solos arenosos e pedregulhosos, contendo de 65 a 90% de areia e quantidade de silte mais argila variando de 10 a 35%.

3. Comportamento Mecânico das Alvenarias

De acordo com Page (1978), geralmente o sistema construtivo de alvenaria era analisado considerando uma associação de blocos e juntas de argamassa.O material desse sistema tinha suas propriedades reológicas baseadas em uma média das propriedades dos blocos e da argamassa. Esse material equivalente tinha seu modelo constitutivo considerado como elástico e isotrópico. Além disso, como o sistema era considerado contínuo, não havia, portanto, interfaces entre blocos e juntas de argamassas, tornando-se impossível avaliar modos de ruptura tipo I e II, devido à tração e cisalhamento, respectivamente. Page (1978) foi um dos primeiros pesquisadores a considerar a alvenaria como uma estrutura constituída de dois materiais, o material do bloco e o material da argamassa. O primeiro tinha comportamento elástico e o outro, inelástico.

As características de ruptura na junta, definida pela violação do critério de resistência de aderência à tração ou ao cisalhamento, foram implementadas em um programa baseado no Método dos Elementos Finitos, sendo modeladas as propriedades não lineares da junta e permitida a ocorrência de ruptura progressiva dessa junta (PAGE, 1978).

Segundo Tauil e Martins Nese (2010), as alvenarias são constituídas por elementos que estão unidos uns aos outros por meio de juntas de argamassa. O conjunto deve formar um elemento coeso e resistente, capaz de suportar esforços horizontais e verticais. Esse tipo de sistema construtivo tanto pode ter função estrutural como apenas de vedação.

De acordo com Roman *et al.* (2007), além de resistir às cargas advindas do próprio peso e das sobrecargas provocadas pelo carregamento da estrutura, as alvenarias também devem suportar esforços laterais, provocados tanto pela ação do vento como pelo desaprumo das alvenarias.

Em estudo com alvenarias de terra comprimida, Gonçalves (2005) aplicou carregamentos em ciclos nas alvenarias, para verificar o comportamento dos muros também no descarregamento. Extensômetros mecânicos foram instrumentados para a obtenção dos deslocamentos. A carga de ruptura máxima foi da ordem de 250 kN. Gonçalves (2005) ainda fez esse estudo em alvenarias com abertura (portas e janelas), usando vergas e contravergas, e estudos em alvenarias sem abertura. As mesmas foram feitas com três alturas diferentes: 2,60 m; 1,80 m e 1,0 m. Ele observou que, em geral, as alvenarias ficam sujeitas a uma flexo-compressão oblíqua. Consequentemente, não se consegue um modo único de ruptura.

4. Interações Entre Alvenarias

A NBR – 15961 não especifica interações entre alvenarias, porém determina que cargas de compressão localizadas sobre apenas uma parte do comprimento de uma alvenaria tendem a se espalhar ao longo da altura da alvenaria, segundo um ângulo de 45° (Figura 1). Na Figura 2, observa-se claramente o efeito das tensões de cisalhamento ao longo da aresta que une os dois planos.

Segundo (VENDRAME, 2008), a interação entre as alvenarias proporciona melhor distribuição das ações verticais em um pavimento, possibilitando assim uma redução na resistência das unidades a serem utilizadas.

No caso de alvenarias com aberturas, também podemos visualizar linhas de tensões de cisalhamento que dividem um único plano em partes, como apresentado na Figura 3. Segundo Vendrame (2008), uma alvenaria com aberturas é considerada geralmente como uma série de alvenarias independentes. Tais alvenarias são unidas através de tensões internas, normais no plano XY, e de cisalhamento. Como vantagem, os carregamentos ficam mais uniformizados. A NBR–15961 também prevê para esses casos um espalhamento segundo um ângulo de 45°, que é interrompido nas aberturas, excluindo as zonas limitadas por planos inclinados a 45° (Figura 4).

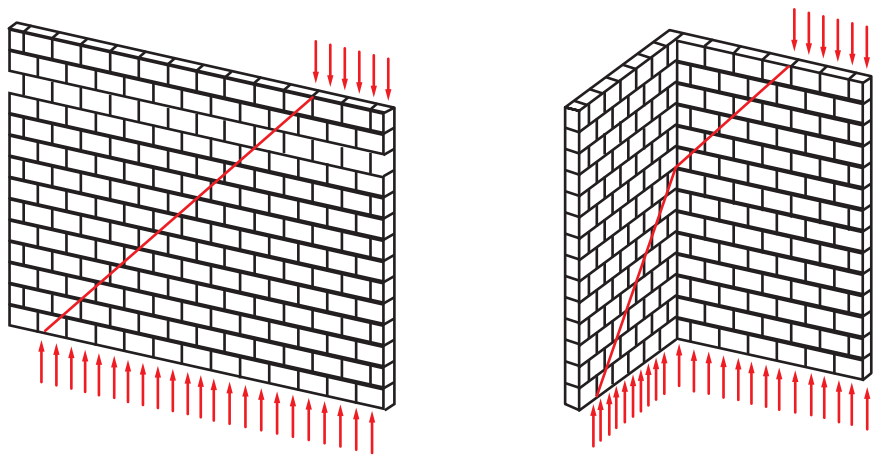


Figura 1. Espalhamento de carregamento em alvenarias planas e em L. *Fonte*: Ramalho e Corrêa (2003).

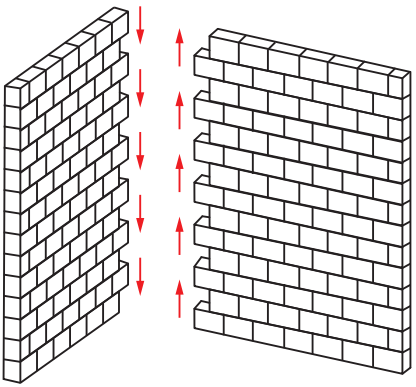


Figura 2. Interação entre cantos de alvenarias. *Fonte*: Ramalho e Corrêa (2003).

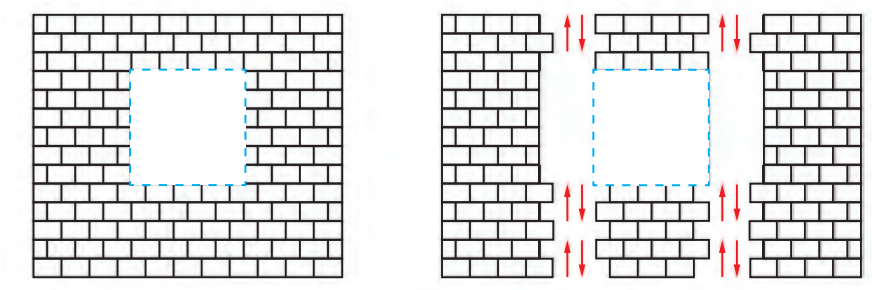


Figura 3. Interação de alvenarias em região de janelas. *Fonte*: Ramalho e Corrêa (2003).

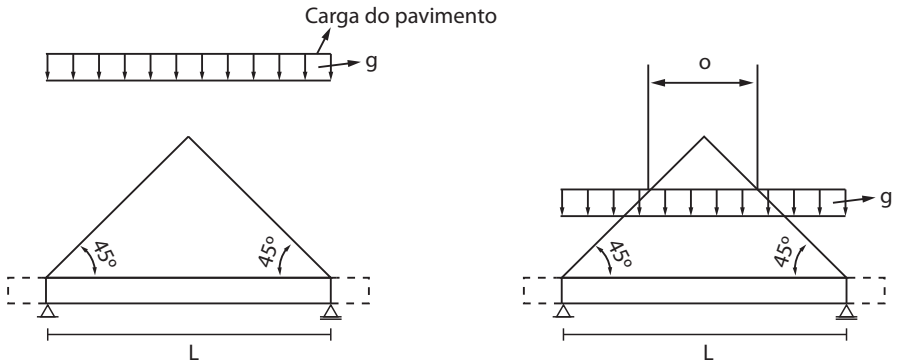


Figura 4. Distribuição das ações tipo carregamento distribuído acima da verga em alvenarias com abertura segundo a NBR - 15961. *Fonte*: Ramalho e Corrêa (2003)

5. Tipos de Carregamentos e Ruptura

Atualmente, os ensaios de resistência à compressão simples em paredes e alvenarias são realizados por meio de aplicação de carregamento uniformemente distribuído. Entretanto, na prática, tais elementos estruturais estão submetidos a carregamentos distribuídos de maneira não uniforme. A propriedade primordial na análise do comportamento mecânico da alvenaria é a sua capacidade resistente à ação de esforços de compressão normais ao seu plano vertical (, 1993). Existem outras propriedades, no entanto, que também são importantes para se verificar o comportamento estrutural da alvenaria: a resistência aos esforços de flexão, a resistência ao cisalhamento e a resistência à tração (MEDEIROS, 1993). Esses esforços, porém, não entram no escopo investigativo do presente capítulo.

Devido à ação de cargas uniformemente distribuídas, as fissuras aparecem em trechos contínuos e verticais. A Figura 5 apresenta um estado de fissuração originado pela deformação transversal da argamassa de assentamento e da eventual fissuração de blocos ou tijolos por flexão local (BAUER, 2007).

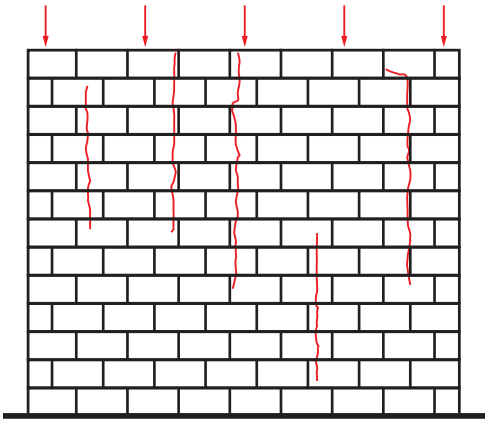


Figura 5. Configuração das fissuras originadas pelo carregamento excessivo de compressão. *Fonte*: Bauer (2007).

Sampaio (2010) descreve que os peitoris de janela são regiões onde comumente há concentração de tensões. Informa também que, nessas regiões, devido à sobrecarga, poderá haver a ocorrência de fissuras, que se manifestarão de forma vertical, conforme ilustrado na Figura 6.

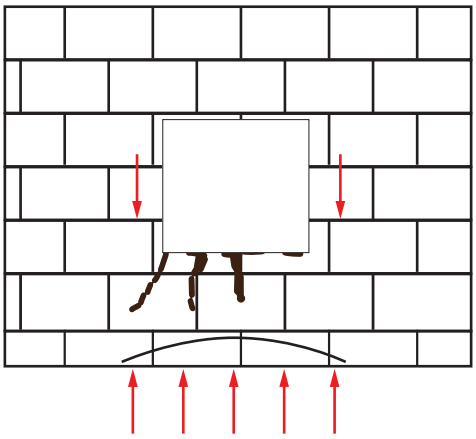


Figura 6. Concentração de tensões sob abertura. *Fonte*: Sampaio (2010).

6. Programa Experimental

O programa experimental aqui desenvolvido refere-se a ensaios de ruptura de dois tipos de alvenaria, uma em L, de 1m de altura, conforme mostrado na Figura 7, e outra com abertura de 2,15m de altura, como mostrado na Figura 8. A alvenaria em L foi concebida no intuito de simular alvenarias que recebessem cargas de lajes pré-moldadas armadas em uma (01) direção. A carga foi aplicada em somente um dos lados da alvenaria, no intuito de se verificar, experimentalmente, o efeito da transferência de esforços de um lado para o outro. Como ilustra a Figura 7, no lado carregado da alvenaria, foi utilizado um perfil metálico de modo a aplicar o carregamento de forma distribuída. A célula de carga utilizada tem a capacidade de 1000 kN. Três defletômetros foram utilizados para medir o encurtamento de cada alvenaria. Um defletômetro foi usado para medir o deslocamento lateral. Todavia, esse efeito de deslocamento fora do plano de carregamento não será abordado por este capítulo. Na alvenaria em L, todos os defletômetros foram posicionados em um quadrado central delimitado pelos terços centrais da altura e comprimento da alvenaria. Os defletômetros D1 e D2 encontram-se situados à mesma altura, porém o D2 está mais próximo da amarração entre as alvenarias.

Na alvenaria com abertura, os defletômetros foram posicionados da seguinte forma: um na parte lateral da abertura à sua meia altura (D1), um na região central abaixo da contraverga (D2) e um na região central acima da verga (D3). Os sinais de carga e deslocamento foram coletados por intermédio de um "*data logger*", modelo 2890-9 da Almemo. Outros dados dos ensaios experimentais serão descritos juntamente com a análise dos resultados.

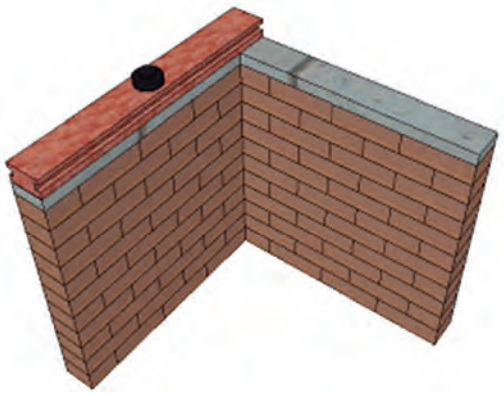


Figura 7. Alvenaria em L. *Fonte*: Própria.

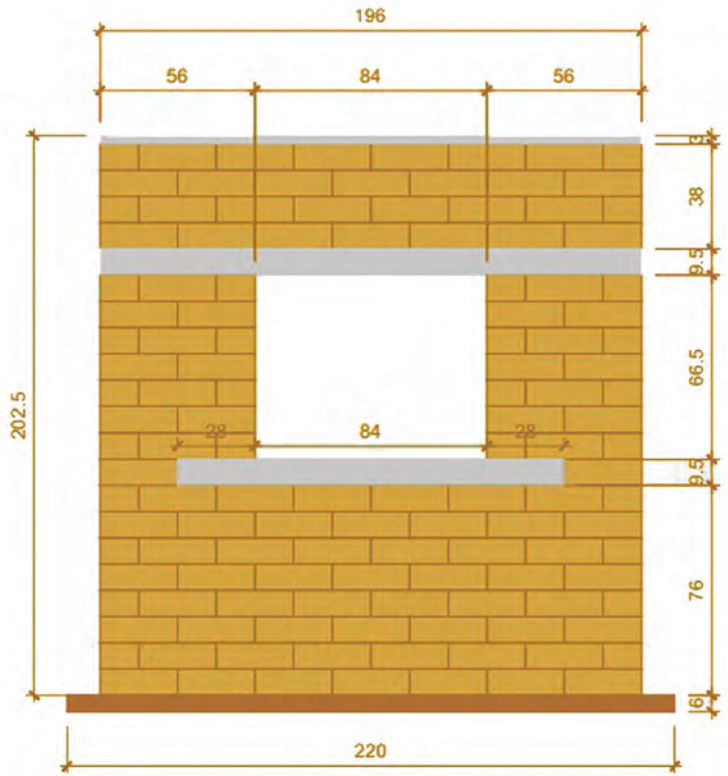


Figura 8. Alvenaria com abertura. *Fonte*: Própria.

7. Caracterização da Terra

O solo empregado na presente pesquisa apresentou as características indicadas na Tabela 1, proporções que qualificam o material para a fabricação de blocos prensados.

Tabela 1. Propriedade da terra empregada.

	Silte + argila (%)	**LP (%)**	**LL (%)**	**IP (%)**
Terra	10 < 20,47% < 40	20,42 NBR 7180 (1988)	26,36 NBR 6459 (1984)	5,93

O teor de areia também manteve-se dentro do intervalo indicado pela NBR NM 248 (2003): 50 < **50,97%** < = 70. O solo foi peneirado de modo a não apresentar pedregulhos na sua composição granulométrica. A massa específica do solo foi de 2,65 g/cm^3, ensaio realizado de acordo com a NBR NM 52 (2009). Desse modo, o solo foi classificado como A-2-4, com no máximo 35% de (silte mais argila) passando na peneira # 200, com LL < 40%, e IP < 10%.

8. Resistência à Compressão de Primas de BTC

A NBR 10836 (ABNT 2013) determina que a resistência média dos tijolos de solo cimento deve ser igual ou superior a 2,0 MPa aos sete dias , mas que os valores individuais não podem ser inferiores a 1,7 MPa. Os BTC foram estabilizados com um teor de cimento de 12%. A resistência à compressão dos blocos foi medida conforme as recomendações da NBR 8492 (2012), como se pode ver na Figura 9. Os blocos foram cortados e as partes foram unidas com argamassa de terra estabilizada com cimento, em uma camada fina de 2 a 3 mm de espessura no traço 1:12. Essa união deve garantir o nivelamento necessário à aplicação uniforme da carga. Após 48 horas de secagem, os blocos foram novamente medidos, pesados e rompidos em uma prensa hidráulica.



Figura 9 - Ensaio de resistência à compressão dos BTC - Fonte: Autoria própria.

A resistência à compressão simples foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do bloco, sem descontar a área vazada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resistência dos tijolos.

CP a 12% nº	Carga Ruptura (kgf)	Resistência (MPa)	Média (MPa)
01	7,752	3,82	
02	7,744	3,81	3,62
03	6,576	3,24	

9. Avaliação Estrutural da Alvenaria em L

Nas Figuras 10 e 11, apresenta-se a alvenaria em L, preparada para o ensaio de ruptura. No lado carregado da alvenaria, foi utilizado um perfil metálico de modo a aplicar o carregamento de forma distribuída. No lado da alvenaria que não recebeu carregamento em seu plano, foi imposta uma condição de contorno de impedimento de deslocamento. Pode-se observar que essa condição de contorno foi simulada fisicamente por meio de duas peças de madeira. A peça inclinada encontrava-se presa ao chão através de pregos e parafusos. Dos três defletômetros usados para medir encurtamento, um foi colocado na sexta fiada (D3), a uma altura aproximada de 55 cm acima do piso, como mostrado na Figura 10, em um lado da parede, e dois foram colocados na oitava fiada (D1 e D2), no outro lado da parede, como mostrado na Figura 11, a uma altura de cerca de 70cm, acima do piso. O defletômetro D2 situa-se mais próximo da amarração que o D1.

Após ensaio de compressão, verificou-se que o rompimento se deu por esmagamento dos blocos, com efeito menor na alvenaria sem carga distribuída, como pode ser observado na Figura 12. Observa-se também uma nítida separação entre os lados das alvenarias em L, devido às tensões de cisalhamento ali presentes, indicando transferência de tensões de um lado para o outro, conforme apresentado na Figura 13.

Na Figura 14, as curvas carga-encurtamento vertical são mostradas para três defletômetros. Conforme esperado, observou-se que os defletômetros encurtaram-se na seguinte ordem: D1 > D2 > D3. No intuito de validar esse comportamento, foi realizada uma modelagem numérica contínua 3D do modelo proposto, com condições de contorno e de carregamento (390 kN) semelhantes ao do ensaio experimental. Os materiais argamassa e BTC foram modelados com características provenientes do ensaio experimental.



Figura 10. Instrumentação dos defletômetros, célula de carga e condição de contorno.



Figura 11. Instrumentação dos defletômetros – Alvenaria em L.



Figura 12. Estado de fissuração no lado da alvenaria submetido a carregamento.



Figura 13. Transferência de carga de um lado para o outro na alvenaria em L.

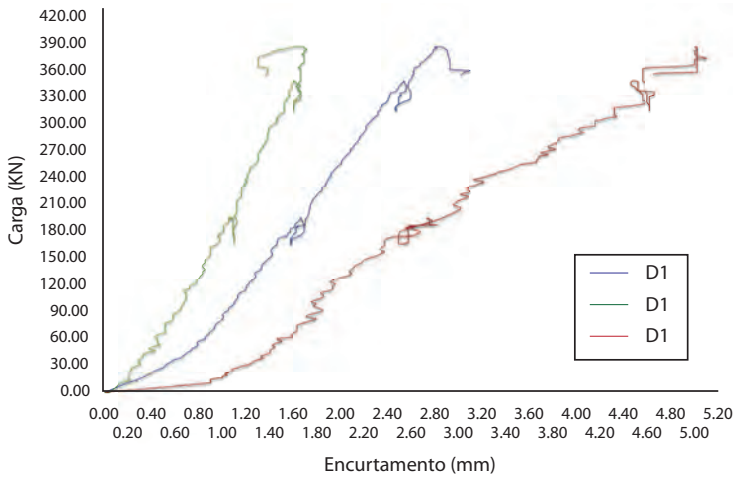


Figura 14. Curvas carga-encurtamento vertical.

Na Figura 15, tem-se um perfil da intensidade dos deslocamentos verticais. Os defletômetros D1 e D2 encontram-se situados à mesma altura, porém o D2 está mais próximo da amarração entre os planos da alvenaria. O modelo mostra nitidamente o efeito da amarração na mitigação da intensidade do encurtamento vertical. Do mesmo modo, à medida que o defletômetro se afasta da linha de carregamento, ou seja, quando situado a uma altura menor acima do piso, a magnitude do encurtamento tende a diminuir, conforme valor obtido pelo defletômetro D3.

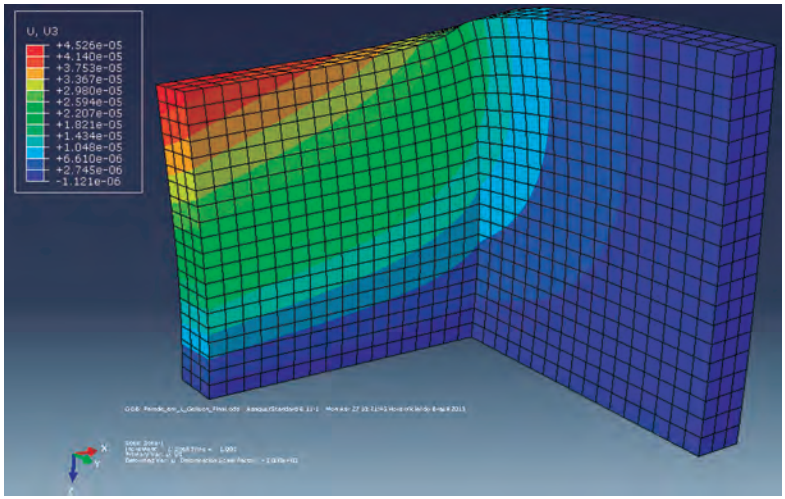


Figura 15. Campo dos deslocamentos verticais (encurtamento).

Na Figura 16, apresenta-se o campo das tensões de cisalhamento no plano S13. Observa-se que as tensões máximas de cisalhamento S13 ocorrem na região da amarração, estando seu valor na parte superior desta região , resultado que valida o modo de ruptura apresentado na Figura 13.

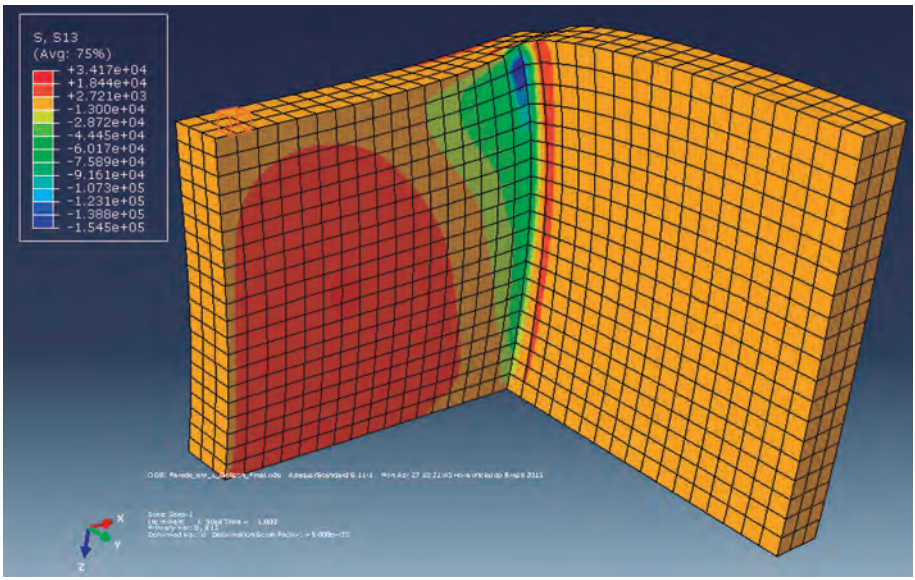


Figura 16. Campo das tensões de cisalhamento S13.

Na Figura 17, apresenta-se o campo das tensões atuantes no plano vertical. Conforme esperado de acordo com a literatura , a diagonal superior da alvenaria que não recebe carregamento praticamente não é carregada à compressão, indicando um caminhamento do carregamento a 45º, conforme mostrado na Figura 1.

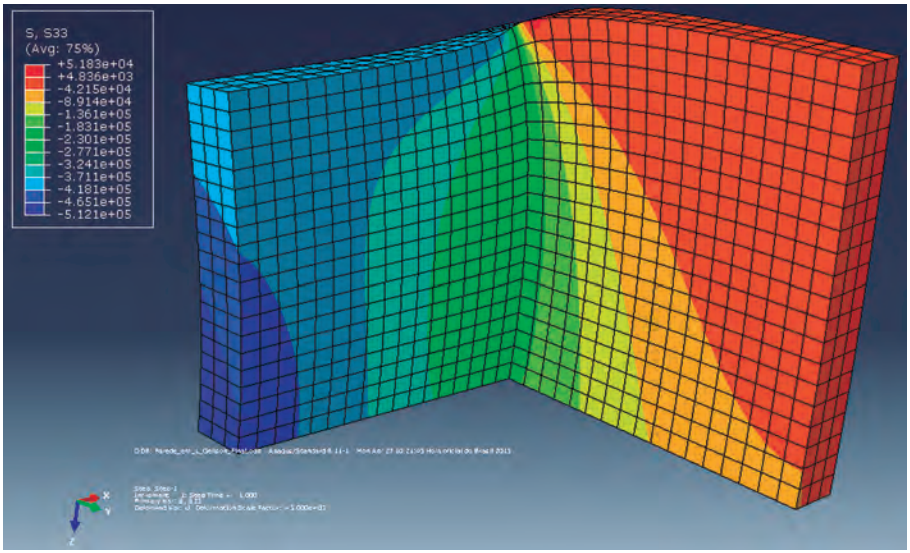


Figura 17. Distribuição das tensões normais no plano vertical.

10. Alvenaria com Abertura, de 2,15 m de Altura

Na alvenaria com abertura, surgiram várias fissuras, tanto na vertical como na horizontal. O rompimento mais uma vez foi causado pelo esmagamento dos blocos, da mesma forma que ocorreu na alvenaria em L, comprovando a influência do material no comportamento mecânico desse tipo de alvenaria. Na Figura 18, apresenta-se o gráfico carga deflexão para os três defletômetros. Conforme esperado, o D2 é o que se encurtou menos já que se encontra localizado na região central, abaixo da contraverga e o D3 é o que se encurtou mais, pois recebe de forma mais imediata o efeito do carregamento distribuído. O D1, por sua vez, situado à meia altura e ao lado da abertura, apresenta ordem de grandeza intermediária de deslocamento por estar localizado abaixo da verga e acima da contraverga. Isso faz com que o carregamento transmitido a essa região já esteja diluído devido ao efeito de flexão da verga.

Na Figura 19, pode-se observar o efeito arco na parte superior da alvenaria, mitigando assim o efeito de flexão na verga. Apesar das condições inerentes às não-linearidades geométricas e dos materiais, assim como de execução e posicionamento centrado da alvenaria sob o pórtico, os resultados encontrados foram bem simétricos e similares aos modelados por meio do Método dos Elementos Finitos, com o uso do *software* Abaqus.

A primeira fissura apareceu sob um carregamento de 84 kN, na face inferior central da verga. Isso já era esperado, pelo fato de, na construção dessas vergas, ser considerado apenas 2 barras soltas de aço CA-50 para combater o efeito de flexão, sem uso de estribos. Desse modo, fica claro que esse método construtivo para as vergas não é o mais eficiente. No entanto, observou-se que, apesar da verga fissurada, a alvenaria ainda conseguiu suportar carga até aproximadamente 360kN. Isso foi possível porque o efeito arco funcionou de modo a transmitir os esforços para a região lateral às aberturas e posteriormente para a região abaixo da contraverga. Os valores de encurtamento foram obtidos até um valor de carga abaixo da ruptura, aproximadamente 230 kN, com o objetivo de não danificar os equipamentos, já que a estrutura é predominantemente constituída de materiais frágeis. Mesmo com a presença de verga, as barras de aço, por estarem soltas, não oferecem uma capacidade de tenacidade suficiente para garantir a leitura dos defletômetros até o fim.

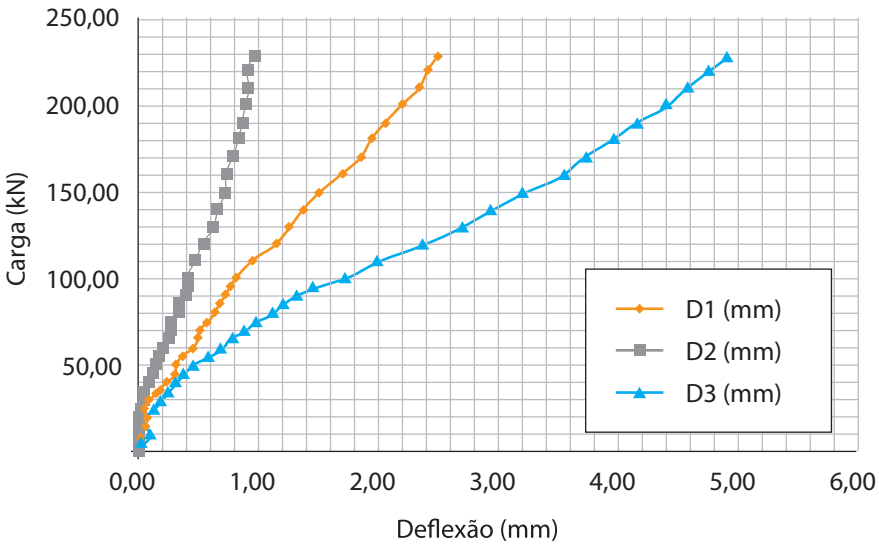


Figura 18. Distribuição das tensões normais no plano vertical.



Figura 19. Distribuição das tensões normais no plano vertical.

Nas Figuras 20 e 21, são apresentadas as distribuições de tensões nos eixos X e Y, respectivamente. Na direção X, observa-se claramente o efeito da flexão na verga e do empuxo na contraverga. Além disso, de modo geral, observa-se uma distribuição uniforme de tensões de tração na alvenaria. Na direção Y, entretanto, como já esperado devido ao ensaio experimental, a distribuição de tensões não é uniforme. Observa-se, na região acima da verga, na área alaranjada sob compressão indicando a formação do arco já observado no experimento. Além disso, o modelo também mostra uma distribuição de tensões de menor valor nas partes laterais da abertura, comprovando o ensaio experimental que apresentou, de fato, menos fissuras nessa região.

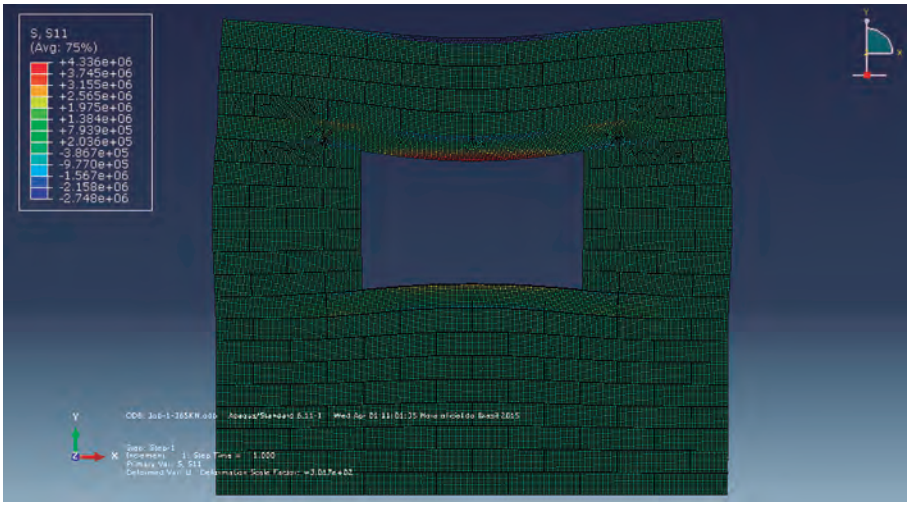


Figura 20. Distribuição de tensões na Direção X.

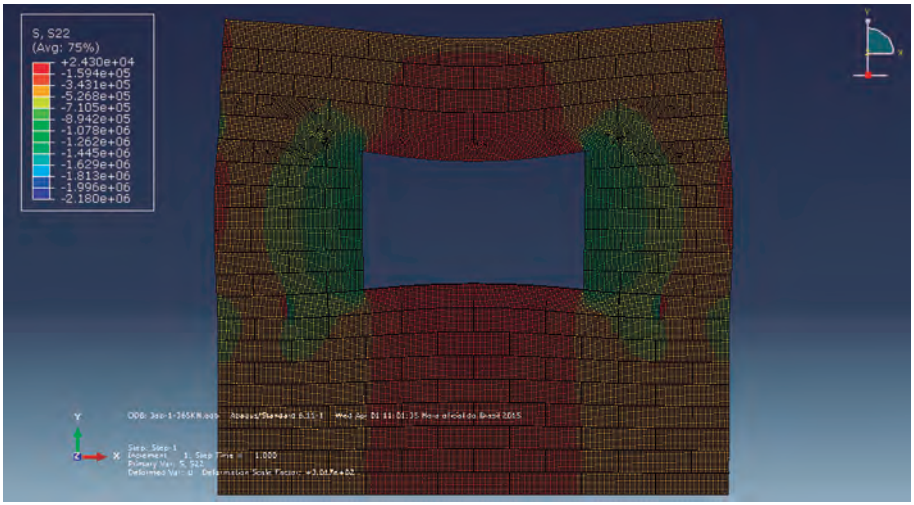


Figura 21. Distribuição de tensões na Direção Y.

A Figura 22 comprova que o modelo numérico foi realizado em um Estado Plano de Tensões.

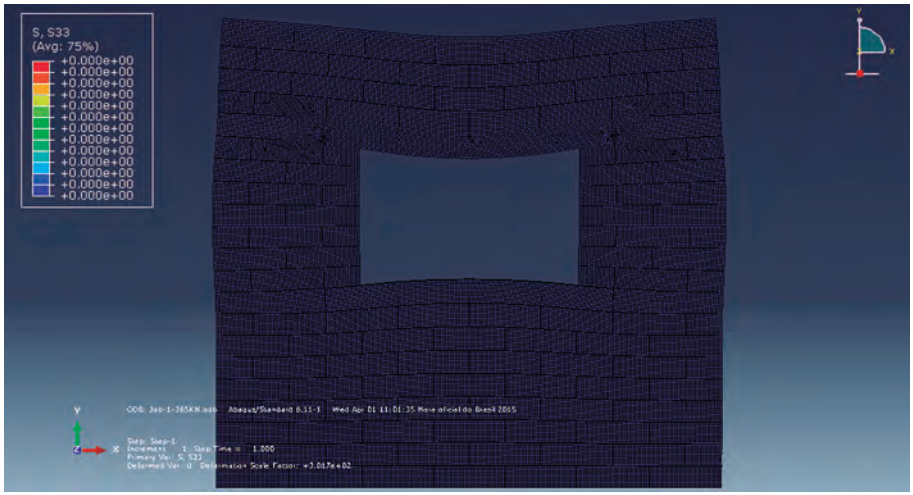


Figura 22. Distribuição de tensões na Direção Z – Estado Plano de Tensões.

11. Considerações Finais

Nos dois tipos geométricos de alvenaria, observou-se ruptura dos blocos, demonstrando a influência do comportamento frágil do material terra, em forma de BTC. Esse comportamento já tinha sido observado por (GONÇALVES, 2005). No que diz respsito às alvenarias de material cerâmico, também houve a transferência de esforços através da amarração, nas alvenarias em L, conforme apresentado por (RAMALHO e CORRÊA, 2003). Essa transferência é garantida graças às tensões de cisalhamento entre os planos, que garantem fisicamente a amarração. No estado limite último, observa-se que os dois planos se separam, indicando ruptura por cisalhamento, no encontro dos dois planos. Foi possível verificar, ademais, o efeito arco acima da verga, conforme já considerado pela norma NBR 15961, responsável por aliviar as tensões de tração na região logo acima da verga. Isso é possível porque os blocos apresentam resistência à compressão suficiente para transferir os esforços de compressão em direção às laterais da alvenaria. Finalmente, é importante ressaltar a necessidade de se modelar numericamente os ensaios experimentais. Observa-se que a alvenaria apresenta não-linearidades geométricas e de material e, ao ser colocada sob o pórtico, pode também não ficar totalmente centrada. Esses aspectos somados podem levar a resultados experimentais um pouco difíceis de serem analisados, caso sejam diferentes da hipótese esperada de comportamento. Por meio da modelagem numérica, pode-se não apenas

validar a hipótese esperada como também os próprios resultados dos ensaios experimentais. E concluiu-se que, apesar das não linearidades presentes no material e na estrutura estudada, problemas de execução - como prumo- , desalinhamento ou falta de retilineidade, o comportamento mecânico das alvenarias se deu de forma coerente e satisfatória, atingindo para a alvenaria em L uma carga de ruptura próxima de 500 kN e para a alvenaria com abertura de 2,1m de altura, uma carga de ruptura de 360 kN.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180* – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459* – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15961* – Alvenaria Estrutural – Blocos de concreto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 10836* - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR NM 248* - Agregado Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52* – Agregados – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8492* – Tijolo Maciço de Solo-cimento – Determinação da resistência a compressão e da absorção d'agua. Rio de Janeiro, 2012.

BARBOSA, N. P., GHAVAMI, K., Terra Crua para Edificações. *Materiais de Construção Civil e princípios da Engenharia de Materiais*. 1. ed. São Paulo. IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538.

BAUER, R. J. F. Patologias em alvenaria estrutural de blocos de vazados de concreto. *Revista Prima* - Caderno Técnico de Alvenaria Estrutural, São Paulo. 13. ed., 2007.

BROWN, J.; EVANS, M.; MORROW, C. *Model Block Press*, Mechanical Engineering Department. California Polytechnic State University – San Luis Obispo, 2014.

GONÇALVES, J. S. *Contribuição para a normalização da alvenaria estrutural com o uso de tijolos de terra crua para construções urbanas*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

GUETTALA, A.; ABIBSI, A;. HOUARI, H. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, v. 20, p. 119-127, 2006.

HEATHCOTE, K. A. Durability of earthwall buildings. *Building Mater*, v. 9, n. 3, p. 185-189, 1995.

MEDEIROS, J. S. *Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto*. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAGE, A. W. Finite element model for masonry. *Journal of Structural Division*, ASCE, v. 104, n. ST8, Aug. 1978.

PINTO, T. P. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo: ABCP, 22 p. 1980.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). *Soil-cement construction handbook*. Illinois, 42 p. 1969.

PROMPT, C. H.; BORELLA, L. L. *Experiências em construção com terra no segmento da agricultura familiar*. Terra Brasil. III Congresso de Arquitetura e Construção com terra no Brasil, Campo Grande – MS, 2010.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. Pini. 2003, São Paulo.

ROMAN, H. R. *et al. Análise de Alvenaria Estrutural*. Santa Catarina: Universidade Corporativa Caixa, 2007, 168 p.

SAMPAIO, M. B. *Fissuras em Edifícios Residenciais em Alvenaria Estrutural*. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenaharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, C. A. *Construção com Terra no Brasil*: Panorama, Normatização e Prototipagem com Terra Ensacada, 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

TAUIL, C. A.; MARTINS NESE, F. J. *Alvenaria Estrutural*. São Paulo: Pini, 2010.

VENDRAME, G. *Alvenaria Estrutural*: fundamentos de cálculo para blocos vazados de concreto. Itatiba: Universidade São Francisco, 2008.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C010

Avaliação da Composição de Solo para Uso em Taipa Estudo de Caso

10

Edna Moura Pinto
George Santos Marinho
Bianca de Abreu Negreiros
Cintia Vieira
Felipe Amorim
Alain Henrique Souza

1. Introdução

O solo é um dos mais antigos materiais utilizados na edificação de inúmeros tipos de construções. Há cerca de 10 mil anos, ele mantém sua importância enquanto material construtivo, sendo na atualidade o responsável por cerca de 60% das habitações da população mundial. Embora haja uma ideia comum de que essas edificações só existam em países em desenvolvimento, na Europa, elas compõem a paisagem de países como Suécia, Dinamarca, Alemanha, Inglaterra, Espanha, Portugal e França, onde aproximadamente 15% da população vive em habitações feitas em taipa ou adobe (RICARDO, 2003).

No Brasil, o solo se firma como importante material construtivo desde o período colonial e atualmente sua importância, ainda que menos exaltada, permanece. Somente no estado do Ceará, mais de 70 mil habitações populares fazem uso da terra como material de construção, o que evidencia a importância desse material construtivo em relação à história e à tradição, não somente do Nordeste, como também do Brasil.

A utilização do solo como material de construção faz uso de diferentes técnicas de acordo com as disponibilidades e necessidades de cada local. Dentre elas, as mais conhecidas são: a taipa de mão, a taipa de pilão, a taipa de sebe, a taipa de sopapo, a taipa leve, o adobe, e, mais recentemente, o

superadobe, o PISE (Terra Estabilizada Compactada Pneumaticamente), o hiperadobe e o COB.

Com o advento da revolução industrial, tais práticas construtivas foram preteridas frente ao surgimento de novos métodos de construção, que contribuíram para a substituição da arquitetura de terra por sistemas e materiais com melhor padronização e racionalização, visando atender as demandas da nova sociedade industrial e suas cidades em transformação.

Não tardou para que o uso do solo entrasse em um processo de decaimento. Em nosso país, atualmente, ele é empregado quase exclusivamente em habitações carentes, sem acompanhamento técnico ou qualidade. Por esse motivo, é constantemente associado à construções com qualidade inferior, não duráveis, insalubres e desprovidas de apreciação arquitetônica.

"A existência de uma vasta literatura acerca das boas práticas construtivas com o uso do solo faz parecer que não há mais nada o que se dizer sobre o assunto. Porém, a prevalência de técnicas negligentes na etapa construtivas e a ausência de métodos efetivos na aferição da qualidade mostram que ainda existe campo de estudo para esse método de construção."

Entretanto, o uso do solo na construção pode apresentar um bom desempenho quando a técnica é utilizada corretamente. Nesse contexto, faz-se importante a pesquisa orientada para a melhora da qualidade técnica das habitações com solo, uma vez que "A maior parte das patologias identificadas já foram estudadas e atualmente tem respostas" (SILVA, 2001, p. 63). Tais soluções, contudo, não foram dadas a partir de inquietações recentes, as primeiras notícias sobre pesquisas com construção de terra datam da revolução francesa, ocorrida em 1789, por meio da figura de François Conteraux (SILVA, 2001, p. 65 apud DETHIER, 1993).

2. A Taipa de Sebe

Como observado, várias são as técnicas para uso do solo em construções. Nossa abordagem aqui se fará sobre a taipa, considerando as vantagens do uso dessa matéria prima, mas com foco em evitar ou minimizar o que lhe confere desvantagem.

O que denominamos taipa compartilha de outras denominações sinonímias. No livro *Arquitetura popular brasileira*, Wainer (2012) descreve 3 denominações: a taipa de mão, a de sebe e a de sopapo como técnicas

diferentes entre si. A técnica aqui apresentada corresponde à taipa de sebe, descrita pelo autor como aquela na qual o barro é aplicado sobre uma trama de varas, ripas ou gravetos.

A taipa consiste tipicamente em um entramado ortogonal feito com madeira roliça ou serrada, com intervalos regulares e espaçamento estimado entre 5 a 20 cm (PISANI, 2006) fixados em esteios/estacas por meio de fibra de sisal, cipó, arame ou pregos,, que ao fim de recebe o preenchimento com terra. A trama pode apresentar-se em diferentes conformações,.A Figura 1 ilustra três tipos de estrutura: A: Único; B: Alternado e C: Paralelo.

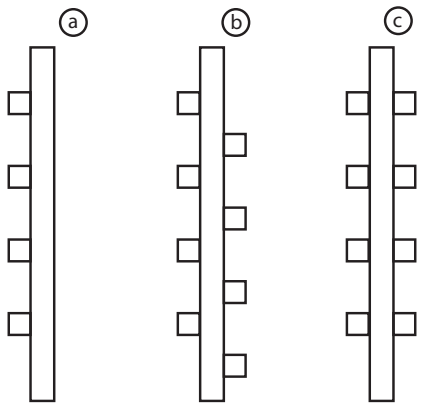


Figura 1. Tipologias de fixação das ripas. A: Único; B: Alternado e C: Paralelo.

Os esteios nos quais os tramos são fixados e os demais apoios verticais são normalmente enterrados diretamente no solo, à profundidade variável. A espessura final das paredes costuma variar entre 15 e 20 cm.

3. Fragilidades do Sistema

Por meio da observação de uma experiência construtiva realizada na cidade de João Câmara/RN, que na década de 80 foi acometida de fortes abalos sísmicos, iniciados em agosto de 1986.

A série de abalos sísmicos resultou em danos a mais de 4.000 edificações, em sua maioria residências, localizadas tanto na zona urbana como na zona rural. Nesse período, o Exército Brasileiro foi responsável por realizar estudos que tinham o objetivo de criar projetos para edificações resistentes, a fim de possibilitar a reconstrução de habitações parcialmente ou totalmente colapsadas

pela ação de abalos sísmicos de até 5.3 graus Richter. O Ministério do Interior (MINTER) abriu uma comissão especial (Portaria nº 28/MINTER de 3/2/1987) que realizou um relatório de necessidades físicas e financeiras para a área, viabilizando um plano de reconstrução/recuperação das edificações baseado no emprego da taipa com painéis pré-fabricados. O projeto Taipa proporcionou aos habitantes locais o uso de financiamento governamental e emprego de mão de obra do batalhão de Engenharia do Exército. Uma melhor descrição dos aspectos construtivos do projeto podem ser consultados em Veloso (2012), Pinto et al. (2013), Dantas (2002).

A realização de entrevistas e visitas *in loco* (Figura 2a) possibilitaram apontar as principais manifestações patológicas das edificações remanescentes ao longo de quase 30 anos, bem como a descrição das tipologias empregadas no projeto (2b) e a identificação de potenciais contribuições que essa experiência poderia somar a uma avaliação de sistema construtivo com foco nas soluções de projeto.

A proposta-fabricação dos painéis vislumbrava a racionalização construtiva por meio da adoção de painéis modulados (figura 2c) e optava por critérios capazes de determinar a correta composição do solo empregado na vedação, como poderemos constatar nessa investigação, ainda assim não pôde impedir a ação de desgastes e o surgimento de manifestações patológicas ao longo do tempo (figura 2d).

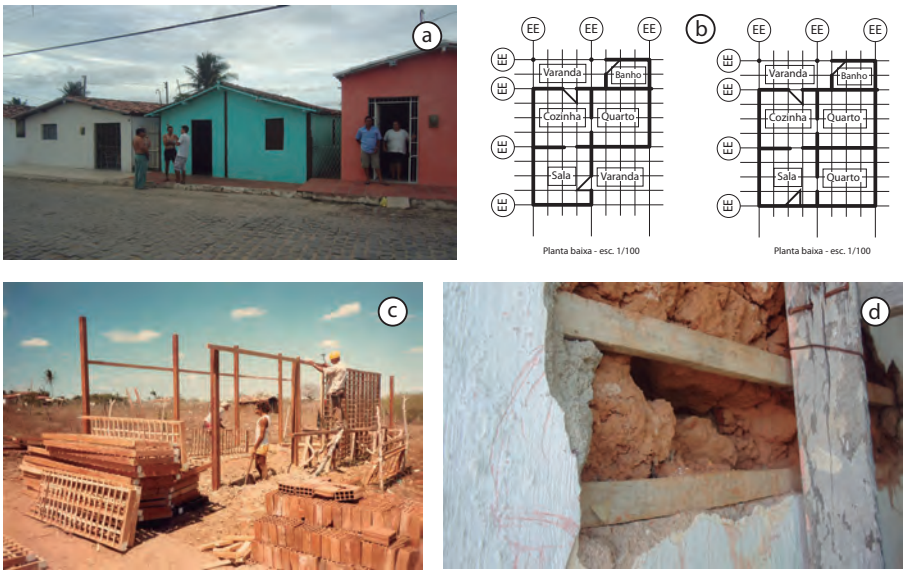


Figura 2. O estudo de caso do projeto Taipa em João Câmara/RN.

A partir da descrição dessas manifestações patológicas, apresentas na figura 3, podemos identificar aquelas que acometem com frequência as paredes (frestas, descolamento, deformações) e o madeiramento (umidade, ataque de xilófagos). Tais patologias podem ser facilmente descritas e identificadas em literaturas sobre o tema, alguns estudos discutem as causas e soluções para esses problemas.

De modo claro, a execução inadequada das vedações em terra pode conduzir a um efeito em cadeia, comprometendo a durabilidade dos outros componentes empregados (ARAÚJO, 2007). Por exemplo, a exposição do tramo de madeira, decorrente das frestas no reboco, promove o apodrecimento da estrutura e a consolidação de vetores de doenças nas frestas, como o omo o barbeiro, inseto transmissor do protozoário que causa a doença de Chagas; ratos e baratas." Portanto, a preocupação com a qualidade do solo utilizado para preenchimento e cobertura do tramo deve ser tratada como questão de segurança estrutural e saúde pública.

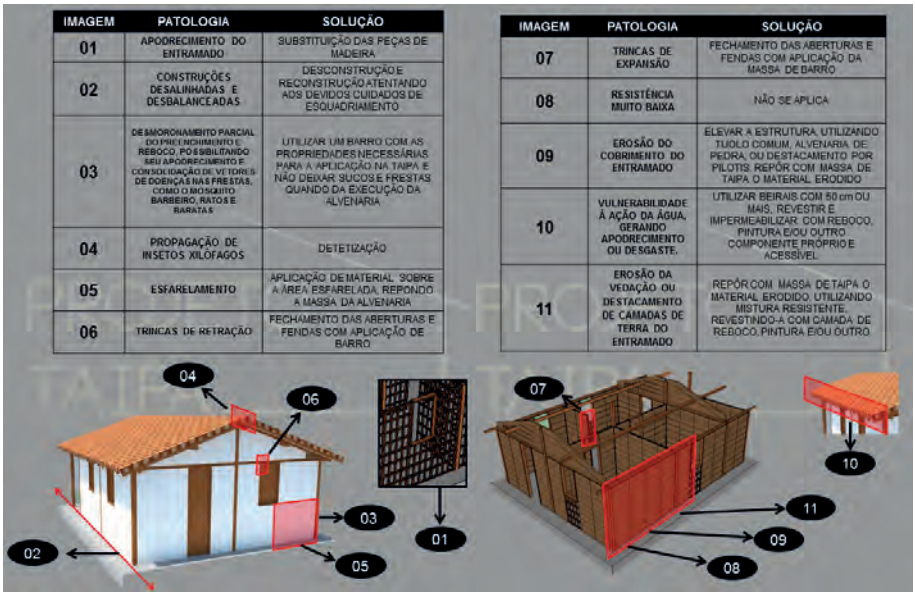


IMAGEM	PATOLOGIA	SOLUÇÃO
01	APODRECIMENTO DO ENTRAMADO	SUBSTITUIÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA
02	CONSTRUÇÕES DESALINHADAS E DESBALANCEADAS	DESCONSTRUÇÃO E RECONSTRUÇÃO ATENTANDO AOS DEVIDOS CUIDADOS DE ESQUADRIAMENTO
03	DESMORONAMENTO PARCIAL DO PREENCHIMENTO E REBOCO, POSSIBILITANDO SEU APODRECIMENTO E CONSOLIDAÇÃO DE VETORES DE DOENÇAS NAS FRESTAS, COMO O MOSQUITO BARBEIRO, RATOS E BARATAS	UTILIZAR UM BARRO COM AS PROPRIEDADES NECESSÁRIAS PARA A APLICAÇÃO NA TAIPA E NÃO DEIXAR SUCOS E FRESTAS QUANDO DA EXECUÇÃO DA ALVENARIA
04	PROPAGAÇÃO DE INSETOS XILÓFAGOS	DETETIZAÇÃO
05	ESFARELAMENTO	APLICAÇÃO DE MATERIAL SOBRE A ÁREA ESFARELADA, REPONDO A MASSA DA ALVENARIA
06	TRINCAS DE RETRAÇÃO	FECHAMENTO DAS ABERTURAS E FENDAS COM APLICAÇÃO DE BARRO

IMAGEM	PATOLOGIA	SOLUÇÃO
07	TRINCAS DE EXPANSÃO	FECHAMENTO DAS ABERTURAS E FENDAS COM APLICAÇÃO DA MASSA DE BARRO
08	RESISTÊNCIA MUITO BAIXA	NÃO SE APLICA
09	EROSÃO DO COBRIMENTO DO ENTRAMADO	ELEVAR A ESTRUTURA, UTILIZANDO TIJOLO COMUM, ALVENARIA DE PEDRA, OU DESTACAMENTO POR PILOTIS. REPÔR COM MASSA DE TAIPA O MATERIAL ERODIDO
10	VULNERABILIDADE À AÇÃO DA ÁGUA, GERANDO APODRECIMENTO OU DESGASTE.	UTILIZAR BEIRAIS COM 50 cm OU MAIS, REVESTIR E IMPERMEABILIZAR COM REBOCO, PINTURA E/OU OUTRO COMPONENTE PRÓPRIO E ACESSÍVEL
11	EROSÃO DA VEDAÇÃO OU DESTACAMENTO DE CAMADAS DE TERRA DO ENTRAMADO	REPÔR COM MASSA DE TAIPA O MATERIAL ERODIDO, UTILIZANDO MISTURA RESISTENTE, REVESTINDO-A COM CAMADA DE REBOCO, PINTURA E/OU OUTRO.

Figura 3. Manifestações patológicas na edificação em Taipa – João Câmara/RN.

Uma construção em taipa bem executada irá exigir especial atenção com a qualidade do solo, ele é o fator que mais contribui para a durabilidade e

tem como principais constituintes a argila, a areia e o silte. A argila exerce influência no desempenho mecânico do solo, ela garante coesão e alguma resistência à ação da água. No entanto, um solo com demasiada argila pode gerar trincas durante a secagem, devido à efeitos de retração. Desse modo, é necessário otimizar sua composição. A dosagem correta de seus constituintes é o que se deve almejar para tornar o material adequado.

É recomendado, sempre que possível, a realização de testes em laboratório para a identificação da qualidade do solo utilizado na taipa. No entanto, essa realidade não é acessível a todas as situações e, nos casos em que não é possível a realização de ensaios laboratoriais, são indicados vários métodos alternativos (DOAT et al., 1979), (CEPED, 1984), (HUNTER et al., 2004), (MINKE, 2006).

Aliada ao uso correto do material é imprescindível a manutenção periódica para assegurar a integridade dos componentes. Embora não seja foco desse estudo de caso, pode-se perceber que as casas em melhor estado de conservação passavam por manutenção à medida que as patologias surgiam, com exceção da pintura que era realizada com periodicidade de aproximadamente um a dois anos.

Em João Câmara, o preenchimento das paredes foi realizado com solo obtido nas proximidades da cidade, no distrito de Queimadas/RN. Para aplicação, ele foi previamente amassado com os pés e posteriormente aplicado com as mãos, a fim de cobrir toda ripa de madeira do painel. Após a secagem do barro, as paredes foram rebocadas com massa única constituída de uma mistura de argamassa de cimento, cal, barro e areia (traço de 1:3:7:1/2) – à exceção do sanitário, no qual é executada uma barra lisa de cimento queimado (traço 1:3 de cimento e areia) para impermeabilização da parede na área molhada. Com o reboco seco, todas as paredes (internas e externas) eram finalizadas com a pintura em duas demãos de cal.

As especificações técnicas previstas em memorial nos levam a ponderar sobre a busca pela qualidade do solo empregado como premissa. Mas, embora todas as edificações fizessem uso de matéria prima comum, algumas edificações foram encontradas em estado precário. O que certamente está relacionado a outras variáveis a serem consideradas caso o solo seja comprovadamente adequado ao uso.

4. Procedimentos para Avaliação da Qualidade do Solo Utilizado no Estudo de Caso

Para se ter uma noção da adequação do material de revestimento submetido ao intemperismo de quase 30 anos, foram realizados ensaios tanto em amostras colhidas no local de extração da matéria prima no barreiro situado na região de Queimadas – RN, denominada amostra A, quanto em amostras retiradas de uma edificação em estado de conservação crítico, identificada como amostra B.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram efetuadas visitas *in loco* para levantamento de dados, realização de entrevistas com moradores e participantes do processo construtivo e coleta de amostras do material. De posse das amostras, foram realizadas as seguintes análises: difração de raios x, granulometria (com base na norma NBR 7181:1984), limite de liquidez (de acordo com a norma NBR 6459:1984), limite de plasticidade (conforme recomendações da norma NBR 7180:1984) e massa específica (segundo a norma NBR 6508:1984). Com base nos resultados das análises, procedeu-se o estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material construtivo.

4.1. Preparação das Amostras

A amostra A foi reunida às amostras retiradas da habitação, e ambas foram submetidas a um processo de secagem ao ar livre. Depois, foram quarteadas e transportadas em bandejas para secagem em estufa. Após a secagem, foram manualmente desagregadas com ajuda de um almofariz e pistilo de porcelana, de acordo com recomendações da norma NBR 6457:1986 – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização através do processo de secagem prévia. Para realizar os ensaios de caracterização, uma alíquota de cada amostra foi destinada ao Laboratório de Cerâmica – DEMAT / UFRN e ao Laboratório de Mecânica dos Solos, do Núcleo Tecnológico Industrial da UFRN.

4.2. Análise Química por Fluorescência de Raios X

A análise química foi realizada empregando-se a técnica de fluorescência de raios X. Nesse processo, utilizou-se o espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (Shimadzu EDX-720/800HS), pertencente

ao Laboratório de Difratometria de Raios X do Centro de Tecnologia da UFRN – INFRA/LIEM.

4.3. Análise Mineralógica por Difração de Raios X

Para análise mineralógica da amostras, empregou-se o Difratômetro de Raios X (Shimadzu XRD 7000) com goniômetro Theta-Theta, pertencente ao Laboratório de Engenharia de Materiais da UFRN.

4.4. Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras e no tratamento estatístico dessa informação. No caso de sedimentos grosseiros, o método mais utilizado é o da peneiração. A peneira para este tipo de análise consiste de um suporte cilíndrico metálico (latão, alumínio, inox, etc.) dotado de uma rede (geralmente metálica, mas que, em alguns casos, pode ser de outro material, como plástico) de malha calibrada. Neste trabalho, foram determinadas as dimensões das partículas individuais e estudada a distribuição pelo peso, volume e número de partículas integradas de cada classe dimensional considerada, seguindo-se as recomendações da NBR 7181:1984.

A aparelhagem necessária foi constituída de balança (faixa de peso nominal entre 0,2 kg e 10 kg e resolução entre 0,01 g e 1 g); recipientes para repouso da amostra; estufa capaz de manter a temperatura entre 60 °C e 65 °C e entre 105 °C e 110 °C; aparelho de dispersão; proveta de vidro; densímetro de bulbo simétrico (calibrado a 20 °C, com resolução de 0,001 g/cm^3) com escala de graduação variando entre 0 °C e 50 °C e divisão de 0,1°C; relógio com indicação de segundos; béquer de vidro; proveta de vidro; tanque para banho; peneiras (50; 38; 25; 9,5; 4,8; 2,0; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm); escova com cerdas metálicas; agitador mecânico de peneiras; baqueta de vidro e bisnaga.

Os ensaios de granulometria foram divididos em duas partes: análise por peneiramento e análise por sedimentação. Os solos grossos (areias e pedregulhos), possuindo pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada utilizando-se somente o peneiramento. Em solos com quantidades significativas de finos, deve-se realizar o ensaio de granulometria conjunta, que engloba as fases de peneiramento e sedimentação. Com base nos resultados obtidos nesse ensaio,

obtém-se a curva de distribuição granulométrica, tendo no eixo das ordenadas (escala aritmética) as porcentagens das partículas e no eixo das abscissas (escala logarítmica) os diâmetros das partículas (em mm). Denominações específicas são empregadas para diversas faixas de tamanho de grãos. No sistema de classificação adotado pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, assumem-se os valores indicados na tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos grãos.

Classificação	Diâmetro dos grãos
Argila	Menor que 0,002 mm
Silte	Entre 0,06 e 0,002mm
Areia	Entre 2,00 e 0,06mm
Pedregulho	Entre 60,0 e 2,0 mm

Fonte: NBR 7181:1984.

Foram utilizados cerca de 70g da amostra peneirada, na qual os grãos maiores, relativos aos pedregulhos, foram retidos, diluídos em solução de água destilada com defloculante e dispersados. Após a sedimentação (em 4, 8, 15 e 30 minutos, e 1, 2, 4, 8 e 24 horas), a amostra foi separada em suas frações de areia (grossa, média e fina) pela sequência de peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25 e 0,15. A fração de argila foi obtida por meio da menor peneira (0,075; #200), que foi separada do silte.

4.5. Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP)

As análises dos Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP) são importantes porque estão diretamente relacionados à trabalhabilidade dos materiais e à variação de volume e absorção de água (LIMA, 2010). Por se tratar de índices de consistência, a determinação desses limites se baseia na constatação dos diferentes aspectos do solo argiloso, de acordo com seu teor de umidade. Além disso, as análises também permitem determinar o Índice de Plasticidade (IP), referente à faixa de valores em que o solo se apresenta plástico. A partir da determinação dos limites de Atterberg e seguindo-se as recomendações das normas NBR 6459:1984 – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180:1984 – Determinação do Limite de Plasticidade, foram determinadas a plasticidade do solo e seus limites de consistência. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN.

O Limite de Liquidez (LL) é definido como aquele em que o teor de umidade do solo admite a abertura de uma ranhura mediante 25 golpes para se fechar na concha do aparelho Casagrande. Neste trabalho, os ensaios para determinação do Limite de Liquidez (LL) foram realizados em conformidade com a NBR 6459:1984. Utilizou-se um aparelho denominado "Casagrande", composto de uma base de ebonite, um conjunto concha e guia do excêntrico, cinzel, uma esfera de aço (8 mm diâmetro), um gabarito, espátula de lâmina flexível (com 80 mm de comprimento), cápsula de porcelana (com 120 mm de diâmetro), balança (com resolução de 0,01g), recipientes para repouso da amostra e estufa (capaz de manter a temperatura dentro das faixas de 60 °C a 65 °C e de 105 °C a 110 °C). Os ensaios somente são executados após verificação dos seguintes itens: eliminação de folga na conexão dos pinos; inexistência de ranhuras na concha; integridade do cinzel; e ajuste do ponto de contato da base da concha (10 mm acima da base).

O Limite de Liquidez (LL) é o grau de umidade do solo, determinado pelo aparelho "Casagrande". O dispositivo é constituído de uma concha metálica acoplada a uma manivela. Quando movimentada, a manivela desloca a concha, fazendo–a cair sobre uma base sólida. São necessários de 15 a 35 golpes para se conseguir o fechamento da ranhura central padrão de 13 mm, feita previamente no solo colocado na concha – metade da amostra, previamente seca e homogeneizada com água destilada. O Limite de Liquidez equivale ao teor de umidade em que a ranhura se fecha com 25 golpes. De acordo com a norma NBR 6459:1984, o LL percentual é obtido por meio da seguinte relação:

$$\text{Água de esfaleramento} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100 \qquad (1)$$

Os gráficos construídos a partir dos resultados obtidos nos ensaios contêm o número de golpes, no eixo das ordenadas (escala logarítmica), e o teor de umidade, no eixo das abscissas (escala aritmética). Dessa forma, gera-se uma reta que permite encontrar o valor aproximado da umidade (expresso em porcentagem) correspondente a 25 golpes (Limite de Liquidez).

O Limite de Plasticidade (LP) é o grau de umidade necessário e suficiente para deslizar sobre uma placa de vidro uma porção de 10 g da amostra do solo umedecido e homogeneizado com água destilada, até formar um pequeno cordão com 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm de comprimento. Dele,

são retiradas partes para determinação da umidade da amostra. No presente estudo, os ensaios de determinação do Limite de Plasticidade (LP) foram realizados seguido-se as recomendações da norma NBR 7180:1984. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, contando-se com a seguinte aparelhagem: placa de vidro de superfície esmerilhada (30 cm de lado), gabarito cilíndrico, espátula de lâmina flexível (80 mm de comprimento), cápsula de porcelana (120 mm diâmetro), balança (resolução 0,01g), recipientes adequados para repouso da amostra e estufa (capaz de manter a temperatura de 60° a 65° e 105° a 110°). De acordo com a norma NBR 7180:1984, o valor do LP é dado pela seguinte relação:

$$\text{Água de esfaleramento} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100 \quad (2)$$

O Índice de Plasticidade (IP) é definido como o intervalo de umidade em que o material apresenta plasticidade. Pode ser determinado de dois modos: pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

ou pela relação estabelecida na norma ABNT / NBR 7180:1984,

$$IP = \%\ \text{de umidade a 25 golpes} - \text{água de esfarelamento} \quad (4)$$

Em geral, os limites de liquidez e de plasticidade dependem da quantidade e do tipo de argila presente no solo. O índice de plasticidade, entretanto, é dependente apenas da quantidade de argila. Na prática, o solo pode ser caracterizado pelo seu índice de plasticidade e seu limite de liquidez.

4.6. Massa Específica

Os ensaios de determinação da massa específica dos solos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais da UFRN, seguindo-se as recomendações da norma NBR 6508:1984.

5. Resultados e Discussões

Fundamentados nos procedimentos descritos, foram realizados os ensaios para coleta dos dados necessários às análises atinentes ao estudo desenvolvido, cujos resultados são apresentados a seguir.

5.1. Análise Granulométrica

Na etapa de peneiramento, constatou-se que os resultados foram muito similares: amostra A = 25,90 % e amostra B = 25,55%, ver tabela 2. No entanto, sabendo-se que a peneira # 200 (0,075 mm) é a mais fina e permite a separação entre o silte (retido) e a argila (passa), a comparação entre o silte retido na peneira evidenciou melhor a diferença entre as amostras, visto que a primeira amostra tinha 18,00g enquanto a segunda tinha 10,10 g, desse modo a amostra A apresenta solo com um conteúdo de silte ligeiramente maior.

Tabela 2. Resultados do peneiramento.

Peneiras		Amostra A		Amostra B	
#	mm	Massa retida (g)	% P passa	Massa retida (g)	% P passa
	25	0	100,00	0	100,00
	19	0	100,00	0	100,00
	9,50	1,7	99,89	0	100,00
4	4,80	15,8	98,83	3,7	99,75
10	2,00	27,90	96,95	66,70	95,22
16	1,20	1,20	95,78	3,10	92,22
30	0,60	8,40	87,58	16,80	75,94
40	0,42	7,40	80,36	11,20	65,09
50	0,30	8,50	72,06	10,40	55,01
100	0,15	29,30	43,47	20,30	35,34
200	0,075	18,00	25,90	10,10	25,55

Observando-se os gráficos apresentados nas figuras 4 e 5, percebe-se que, apesar de semelhantes, a curva relativa à amostra B apresentou maior elevação na parte de silte e areia fina.

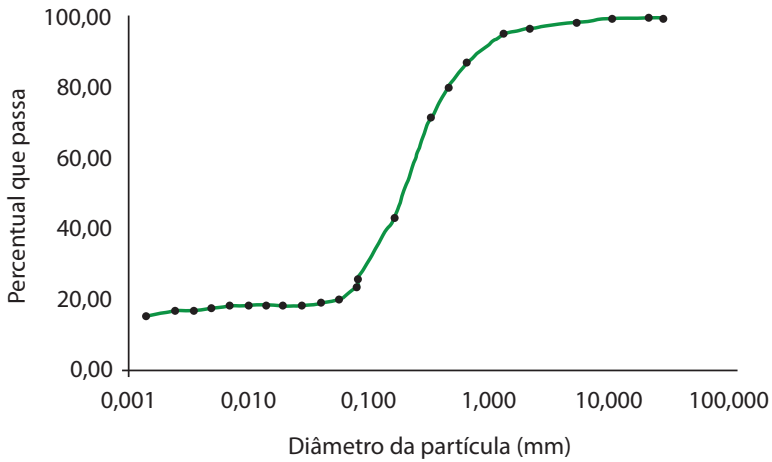


Figura 4. Curva de granulometria – amostra A.

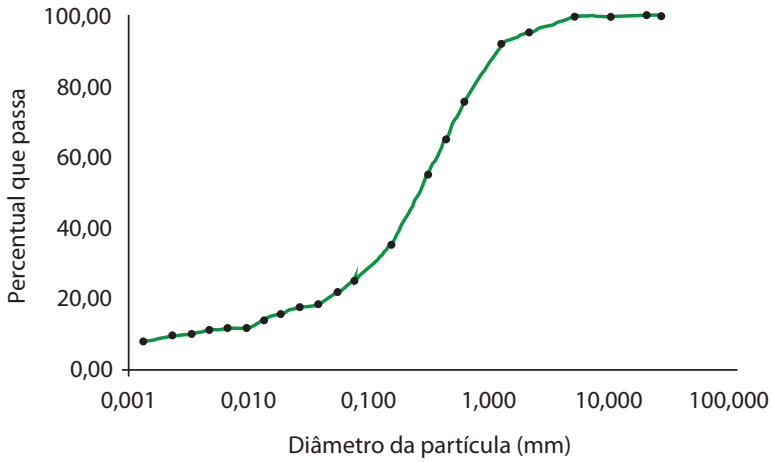


Figura 5. Curva de granulometria – amostra B.

5.2. Sedimentação

A etapa de sedimentação, baseada na Lei de Stokes, mede diretamente a distribuição de sedimentos, em função do tempo necessário para essas partículas se sedimentarem em uma célula vertical ou centrífuga com um líquido conveniente. A velocidade de sedimentação de cada partícula é proporcional à diferença de densidade em relação ao meio e ao quadrado

do seu diâmetro. Na tabela 3, apresentam-se os resultados dos ensaios de sedimentação.

Tabela 3. Resultado da sedimentação.

	% P passa (< Di)	
Tempo (min)	**Amostra A**	**Amostra B**
0,5	24,07	25,18
1	20,31	22,22
2	19,55	18,52
4	18,80	17,78
8	18,80	16,30
15	18,80	14,07
30	18,80	11,85
60	18,80	11,85
120	18,05	11,11
240	17,30	10,37
480	17,30	9,63
1440	15,79	8,15

Conforme se observa na tabela 3, no intervalo entre 4 e 60 minutos, a porcentagem (%P) que passa (< Di) da amostra A manteve-se constante em 18,80 %, enquanto na amostra B o valor sofreu um decréscimo. Concluiu–se que a amostra A apresentou componentes granulométricos de menor diâmetro em maior quantidade, ou seja, maior quantidade de argila e silte.

5.3. Análise Mineralógica por Difração de Raios X

Nas figuras 6 e 7, apresentam-se os resultados dos ensaios de DR-X.

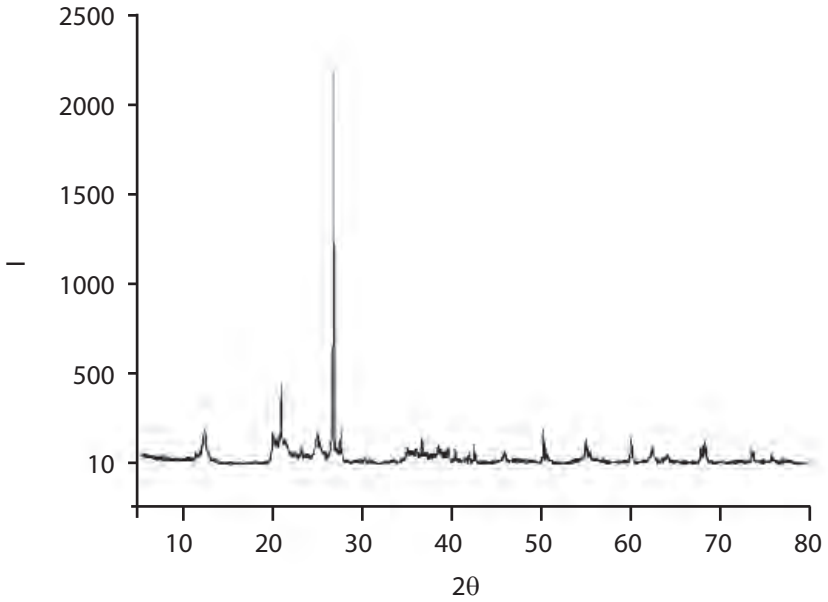


Figura 6. Difração de raios x – amostra A.

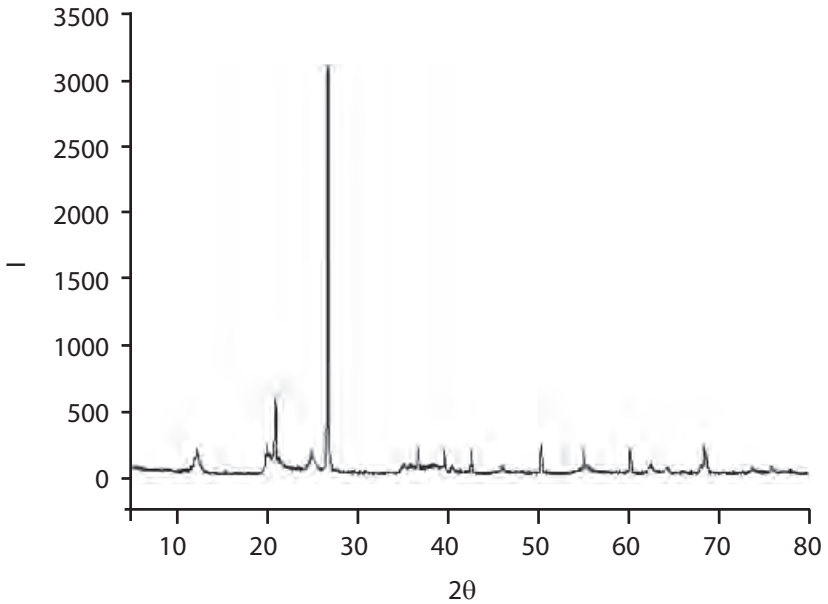


Figura 7. Difração de raios x – amostra B.

Foi identificado que as amostras A e B apresentaram a mesma proporção de quartzo e caulinita, o que permite inferir que a argila A é a mesma utilizada na fabricação das habitações. O quartzo é o esqueleto da argamassa e sua presença diminui a necessidade de água. Por sua vez, a caulinita confere plasticidade e adesão à argamassa, enquanto a matéria orgânica presente nas amostras confere resistência mecânica em variações negativas de temperatura e, junto à caulinita, contribui para permeabilidade do material.

5.4. Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP)

Os valores estimados nos ensaios de limite de liquidez das amostras ficaram relativamente próximos: amostra B= 17 % e amostra A= 20,5 %.

A amostra B apresentou limite de plasticidade de 10,7% e índice de plasticidade de 6,3; enquanto a amostra A apresentou limite de plasticidade de 11% e índice de plasticidade de 9,5.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
A	20,5	11	9,5
B	17	10,7	6,3

A determinação do LL e LP de um solo objetiva o conhecimento da plasticidade do mesmo. A plasticidade consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade e sem variação de volume; é indicada pelo "índice de plasticidade". Quanto maior o IP, mais plástico será o solo em determinadas condições de umidade.

De acordo com as definições e os resultados obtidos, concluiu-se que o solo da amostra B caracteriza-se como pouco plástico e arenoso, enquanto o da amostra A apresenta-se com plasticidade média e siltosa.

5.5. Massa Específica

A massa específica da amostra A ficou em 2,848 g/cm³, enquanto da B o resultado foi de 2,891 g/cm³. A diferença de cerca de 1,5 % entre as amostras pode ser atribuída à presença de aditivo ou à maior presença de argila na amostra A. Como o fator K de variação volumétrica em função da temperatura é igual para ambas, conclui-se que a amostra B apresentou maior

teor de umidade (mais de 200% de diferença) do que a amostra retirada *in loco* para medição. Na amostra B, a variação do peso específico entre as diferentes amostras foi de 2,2%; enquanto a amostra A apresentou uma variação de 1%, indicando que no segundo caso a amostra era mais homogênea que no primeiro. De acordo com Pinto (2006), o peso específico de referência para os solos é 27 kN/m³, equivalente a uma massa específica de 2,646 g/cm³. Nas nossas amostras consideradas no presente estudo, foram obtidos valores médios de 2,891g/cm³, no caso da amostra B, e de 2,848 g/cm³ para amostra A , ou seja, números bem mais próximos aos 2,940 g/cm³ do máximo comum apontado que dos 2,646 g/cm³ do valor de referência. A amostra A apresentou um valor cerca de 7,63 % maior do que o valor de referência, indicando uma quantidade de argila consideravelmente grande na amostra. Especificamente para a amostra B, essa afirmação pode ser desconsiderada se for comprovada a existência de aditivo.

6. Considerações Finais

Os ensaios em laboratório que subsidiaram as análises realizadas neste estudo e que permitiram a caracterização do material constituem a etapa inicial para realização de outros estudos sobre características mecânicas e de durabilidade dos materiais, os quais fornecerão parâmetros que, paralelamente às análises *in loco*, possibilitarão elaborar critérios de avaliação da durabilidade do sistema construtivo em taipa de mão. Como resultado, podemos concluir que as amostras analisadas apresentaram boa qualidade, sendo a amostra natural - A caracterizada por maior homogeneidade e maior quantidade de argila, enquanto a amostra utilizada na construção das habitações – B se caracterizou por apresentar maior umidade e possível presença de aditivos. Nas análises realizadas com base nos resultados dos ensaios, constatou-se que as amostras apresentaram quantidades similares de quartzos e caulinita, fato que permite afirmar que a argila da amostra - A é a mesma utilizada na fabricação das habitações e que ela possui componentes granulométricos de menor diâmetro em maior quantidade (maior quantidade de argila e silte). A determinação desses parâmetros permitiu determinar se o material empregado nas edificações foi adequado, contribuindo para adesão ao entramado de madeira e para a redução de trincas e estabilidade do solo na trama.

A experiência de quase 30 anos com a taipa de sebe em João Câmara demonstrou que requisitos técnicos foram considerados qualidade da matéria

prima utilizada, dando uma clara ilustração da longevidade da técnica quando se parte da escolha apropriada de matéria prima. No entanto, o solo comum a todas as edificações não impediu que algumas construções se apresentassem em estado de conservação precário. Notadamente o fator manutenção é uma variável primordial para a durabilidade e deve ser alvo de futuras investigações.

Agradecimentos

À FINEP, aos bolsistas , ao Laboratório de Cerâmica – DEMAT / UFRN e ao Laboratório de Mecânica dos Solos, do Núcleo Tecnológico Industrial da UFRN.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, B. A. *Recomendações para melhoria tecnológica da vedação vertical em técnica mista em habitação de interesse social: Um estudo de caso no bairro do Alegre em São Sebastião do Passé*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR7181*. Solo – Determinação da Análise Granulométrica dos Solos. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459*. Solo – Determinação do Limite de Liquidez.Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180*. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6508*. Grãos de Solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio. Rio de Janeiro,1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457*. Amostras de solo – preparação para ensaios e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. PROGRAMA THABA – Camaçari-BA. *Manual de Construção com Solo-Cimento*. São Paulo,1984.

DANTAS, R. de C. *Estudo bioclimático das habitações do Projeto Taipa em João Câmara/ RN: ênfase no desempenho térmico*. 2002. 149f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2002.

DOAT, P et al. *Construire en terre*. Ed. Centre de Reserche et d`application – Terre. ed. 1. France. 1979.

HUNTER K.; KIFFMEYER D. *Earthbag Building*: Tools, Tricks and Techniques. New Society Publishers, 2004.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO, COMANDO MILITAR DO NORDESTE - MECMN- 1º GRUPAMENTO DE ENGENHARIA. Destacamento João Câmara-DJC. *Projeto Taipa, especificações*. João Câmara, 1987. 13 p.

LIMA, R. do C. de O. *Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito*. 2010. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. 2010.

MINKE, G. *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser – Publishers for Architecture. 2006.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, E. M.; NEGREIROS, B. A.; VIEIRA, C.; SOUZA, A. H. Rammed Earth Homes Built In Northeast Brazil as an Emergency Housing Policy. In: Earth USA 2013 -Seventh International Conference on Architecture and Construction with Earthen Materials. 4 -6 October, 2013. Santa Fe, New Mexico, USA. 2013.

PISANI, M. A. J.; CANTEIRO, F. Taipa de mão: história e contemporaneidade. *AEDIFICANDI Revista de Arquitetura e Construção*, São Paulo, v. I, n. 2, p. 1-21, 2006.

RICARDO, U. Um Material de Construcción al Alcance de Todos, Métodos Modernos de Construcción com Terra, Experiencia. Centro de Referencia Del Habitat, 2003.

SILVA, M. S. D. A *Terra Crua como Alternativa Sustentável para a Produção de Habitação Social*. 2001. 60f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.

VELOSO, J. A. V. *O Terremoto que Mexeu com o Brasil*. 1ª ed. Brasília: Thesaurus Editora, 2012. 342p.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C011

Critérios para Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem de Materiais de Sistemas Construtivos Inovadores

11

Letícia Mattaraia
Andreia Martins
Márcio Minto Fabricio

1. Introdução ao Desmonte

Este capítulo aborda o tema do Desmonte e Reciclagem de Sistemas Construtivos Inovadores voltados para o setor da construção civil. Muitos arquitetos especificam materiais resistentes e duráveis com intenção de fazer uma obra consistente e que resista por muitos anos. No entanto, as cidades passam por alterações constantes e, muitas vezes, é necessária a demolição ou retirada de elementos para a manutenção.

O setor da construção civil é um grande consumidor de matérias-primas e gera muito desperdício, portanto, é importante procurar alternativas para a demolição e averiguar se existem meios para facilitar a reciclagem e o reuso dos materiais utilizados.

Os autores Rocha e Sattler (2009), John (2000), Tessaro e Sá et al. (2012) afirmam que esse setor é um grande consumidor de energia e matérias primas, além de poluidor devido à elevada quantidade de materiais que são desperdiçados e despejados.

Dessa maneira, é importante considerar as possibilidades de desmonte dos sistemas inovadores, para que no futuro os seus resíduos não gerem graves consequências ambientais, e também para possibilitar a ampliação do seu ciclo de vida, além de evitar que novos materiais precisem ser fabricados, economizando os recursos naturais.

Portanto, a adoção de práticas mais sustentáveis na fase de demolição é uma questão a ser considerada, pois essa etapa contribui com uma grande porcentagem da quantidade total de resíduos gerados (ROCHA; SATTLER, 2009). Assim, foram pesquisadas diversas características que podem facilitar o desmonte sem que haja danos aos componentes e materiais, viabilizando a sua reutilização.

Com base na revisão bibliográfica sobre o tema e na realização de estudos empíricos, foi possível desenvolver critérios de avaliação que auxiliem o desmonte e a reciclagem de materiais que podem servir de parâmetros para avaliar a facilidade do desmonte de sistemas construtivos inovadores. Os critérios focam pontos importantes a serem considerados nas tomadas de decisões ao longo do projeto. Também fornecem orientações para o desenvolvimento de novos sistemas construtivos, pois cada vez mais são exigidas pelos clientes e órgãos reguladores soluções que reduzam o desperdício e o impacto ambiental.

2. Lógica de Projeto do Sistema

O Projeto para o Desmonte é uma tradução da expressão em inglês *Design for Disassembly* (DfD). Esse conceito é mais utilizado em outros setores industriais, como automobilístico e eletrônico. No entanto, pode oferecer orientações para o setor da construção civil, como princípios e práticas (AMOÊDA, 2009).

Diversos autores brasileiros utilizam a expressão Projeto para o Desmonte ou Projeto para a Desconstrução. Este último termo, muitas vezes, é citado para se referir a uma obra que foi construída sem a intenção de ser desconstruída, porém são utilizadas algumas soluções para que essa ação seja possível. Dessa maneira, a expressão Projeto para o Desmonte será mais utilizada, uma vez que reflete melhor o conceito de projetar para um futuro desmonte de subsistemas, componentes e materiais, prática que seria a ideal quando o intuito é a reutilização dos materiais . Além disso, quando se remete ao termo Desconstrução, na arquitetura, pode se confundir ao movimento "desconstrutivista", que não tem qualquer relação com o assunto em questão.

O Projeto para o Desmonte visa facilitar a desmontagem, pois propõe um *design* que considere maneiras de retirar os materiais e componentes de forma que seja possível a reutilização ou reciclagem (THORMARK, 2001). Além disso, o projetista deve tomar decisões de projeto considerando a vida útil,

custos e questões ecológicas em todo o ciclo de vida dos materiais (KLOHN; FERREIRA, 2009).



Figura 1. Representação do ciclo de vida dos materiais (do Berço ao Berço) (Autor).

Esse conceito pode ser aplicado durante o projeto de arquitetura do edifício, ou até mesmo antes, no desenvolvimento de novos sistemas construtivos que facilitem o desmonte e o reaproveitamento de materiais. Conforme indicado na figura 1, o ideal seria que o material tivesse um ciclo de vida de berço ao berço, ou seja, que pudesse ser reciclado ou até reutilizado, para evitar desperdício ou consumo excessivo de matérias- primas.

A avaliação do potencial de Desmonte é uma abordagem inovadora, pois deve considerar todo o ciclo de vida dos materiais nessa fase (GUY; ROCHA, 2005). Diversos aspectos devem ser analisados durante o desenvolvimento do sistema construtivo, a fim de se considerar e ampliar a possibilidade de desmonte não destrutivo dos materiais e componentes. Assim, ao considerar um sistema construtivo inovador, é importante verificar sua composição, ciclo de vida, durabilidade, entre outras características, para possibilitar o desmonte correto e aumentar as possibilidades de reuso e reciclagem.

Gehin, Zwolinski e Brissaud (2008), Soares, Souza e Pereira (2000), Rocha e Sattler (2009), Edwards e Bennett (2003), Guy e Rocha (2005), Go et al. (2011), Lee e Cho et al. (2010) falam sobre a importância da ACV

(Avaliação do Ciclo de Vida) dos produtos e procuram fechar o ciclo de vida dos constituintes de um sistema construtivo, dado que o ideal é que cada material seja utilizado até o seu desgaste e posteriormente reciclado.

No entanto, é importante priorizar a reutilização, pois na reciclagem há consumo de energia, matérias-primas e transporte. Portanto, se o material puder ser reutilizado sem perder as suas características originais, é possível obter uma maior economia.

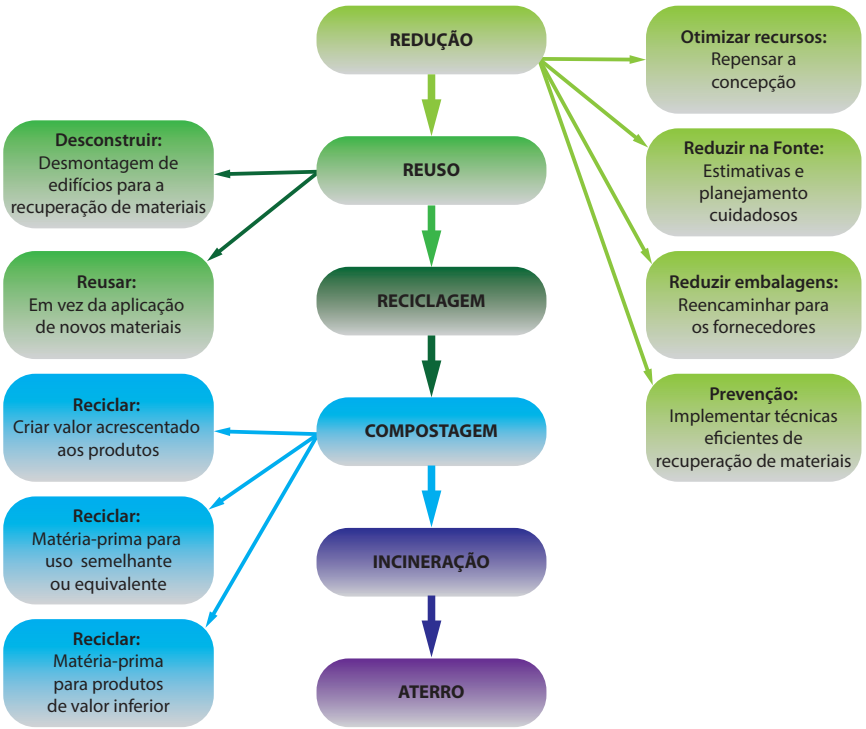


Figura 2. Hierarquia da gestão de resíduos para a demolição e operações de construção (adaptado de: KIBERT; CHINI, 2000).

Além disso, para se projetar um sistema construtivo que venha a ser desmontado, torna-se necessário considerar metas econômicas e de responsabilidade ambiental, pois tal atitude visa recuperar componentes e materiais, além de simplificar as reparações, renovações e substituições (GUY; ROCHA, 2005). O projetista pode considerar diversos aspectos dos materiais, como a vida útil, o custo e as questões ecológicas em todo o ciclo (KHLOHN; FERREIRA, 2009). Afinal, o potencial do Desmonte pode

reduzir significativamente grande quantidade de resíduos sólidos originários da demolição (GUY; ROCHA, 2005).

Algumas características específicas da indústria da construção civil dificultam o potencial para o Desmonte em relação aos outros setores industriais. Brewer e Mooney (2008) citam alguns exemplos:

- A dificuldade de identificação de componentes individuais e produtos com dados significativos de reciclagem;
- Os altos níveis de utilização dos materiais genéricos e compostos utilizados na construção;
- A disparidade entre o projetado e a realidade construída, em que há substituições não autorizadas de produtos especificados por outros materiais;
- Cuidados com os componentes do sistema construtivo em relação à toxicidade dos produtos e com o uso de materiais e revestimentos que atualmente são considerados seguros e aceitáveis , mas que, mais tarde, podem ser considerados perigosos para a saúde ou para o meio ambiente.

Além disso há três pontos centrais que devem ser considerados ao se projetar para o desmonte: realizar de maneira sustentável, considerar os diferentes sistemas construtivos dos edifícios e a hierarquia dos diferentes materiais e componentes (CROWTHER, 2005).

O edifício é composto por diversos componentes e materiais, portanto, é importante analisar como os sistemas construtivos serão relacionados. Segundo Heriqson, Rocha e Sattler (2008) os sistemas construtivos podem ser definidos da seguinte maneira:

- **Materiais**: sem função específica (cimento, areia, pintura, placas, perfil de aço);
- **Componentes**: produtos com funções definidas (janelas, fechamentos);
- **Subsistemas**: materiais com componentes que têm funções próprias (módulos sanitários, estruturas, vedações, cobertura, fachada);

Portanto, analisar como será a relação entre materiais, componentes e subsistemas durante o desenvolvimento do projeto do sistema construtivo

é essencial para se obter melhores resultados na futura desmontagem e na reutilização, sem comprometer os materiais e componentes. Isso também auxilia na manutenção do edifício, uma vez que a obra pode passar por diversas alterações e substituições ao longo de sua vida útil (CROWTHER, 2005; HERIQSON; ROCHA; SATTLER, 2008).

A seguir, serão apresentados os critérios a serem analisados ao longo do desenvolvimento do projeto para se obter o melhor resultado na futura desmontagem do edifício. Posteriormente, apresenta-se um *checklist* que serve como uma ferramenta para contribuir com o processo de desmonte.

Critérios para a Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem Relativo ao Projeto de Sistemas Construtivos:

C1. **Projetar de maneira que facilite o desmonte** - O ponto de partida é considerar o DfD desde o início do projeto. Assim, conforme as decisões tomadas, é possível considerar opções que facilitem a desmontagem (SANTINI e HERMAN, 2010; HERIQSON, ROCHA e SATTLER, 2008; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C2. **Considerar o porquê, o que, onde e quando desmontar** - torna o processo mais racionalizado e eficiente. Tais perguntas auxiliam no processo do projeto para encontrar soluções que facilitem a desmontagem. Por exemplo, a pergunta "porque é necessário desmontar?" ajuda a identificar, por exemplo, a causa do desmonte, se o sistema construtivo está danificado, se encerrou o ciclo de vida ou se mudou de uso. Já o questionamento sobre o que será desmontado, ajuda a programar melhor as ações sem que se danifiquem outros elementos. A indagação "Onde desmontar?", por sua vez, pode auxiliar na projeção de espaços para a desmontagem. E a investigação de quando desmontar é importante para saber as características e ciclo de vida dos elementos (CROWTHER, 2005);

C3. **Orientar os clientes e usuários sobre as possibilidades de projeto abordadas ao longo de seu desenvolvimento** - deixar o cliente ciente das decisões tomadas e da importância de considerar o desmonte (CROWTHER, 1999 e 2005);

C4. **Evitar o excesso de ferramentas** - considerar maneiras simples de desmontar e ferramentas fáceis de serem manuseadas (ROMEIRO FILHO, 2010);

C5. **Considerar a relação entre custo e tempo** - muito importante para tornar a desmontagem viável (GO, WAHAB et al., 2011);

C6. **Utilizar estruturas simples** - quanto mais complexo o sistema construtivo, mais difícil é a sua padronização, construção e futura desmontagem, pois cada elemento estrutural deverá ser desmontado de uma maneira e, se for muito complexo, a desmontagem pode demorar muito tempo e, muitas vezes, até danificar os materiais (ROMEIRO FILHO, 2010; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C7. **Adotar sistemas construtivos abertos** - projetos com plantas abertas e *layouts* simplificados possibilitam uma melhor manutenção do sistema construtivo, sem precisar intervir em outros sistemas do edifício. Além disso, torna o sistema mais flexível para diferentes usos. Na desmontagem, os sistemas construtivos abertos permitem melhor acesso aos elementos e, eventualmente, podem dispensar a necessidade de demolição (YUBA, 2005; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C8. **Evitar misturar diferentes sistemas construtivos** - para cada sistema, há uma maneira de desmonte, que serve de ferramentas específicas, assim, ao utilizar o mesmo sistema construtivo em todo o edifício, a desmontagem é mais eficiente (WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C9. **Utilizar sistemas modulares** - torna a construção e desmontagem mais racionalizadas, visto que se repetem tamanhos de elementos e sistemas de encaixes, o que facilita a desmontagem por conta do uso das mesmas ferramentas e dos mesmos sistemas (GUY e SHELL, 2002; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C10. **Utilizar elementos pré-fabricados** - quando os elementos seguem uma padronização e são pré-fabricados, a construção e a desmontagem tornam-se mais práticas;

C11. **Evitar elementos de grandes dimensões, considerando a escala humana** - facilita a desmontagem e evita riscos maiores para os

operários ao simplificar o manuseio de ferramentas e materiais, além do transporte e armazenamento (GUY e SHELL; 2002);

C12. Procurar soluções estruturais que facilitem a reutilização – estabelecer um acordo entre proprietário, arquiteto e engenheiro para projetar de maneira integrada e buscar as melhores soluções estruturais (GUY; SHELL, 2002; WEBSTER, COSTELLO, 2005);

C13. Prever a sequência do desmonte - avaliar quais materiais e componentes podem ser desmontados primeiro, sem danificar os outros, no fim de vida útil do sistema construtivo (GO; WAHAB et al., 2011);

C14. Considerar os diferentes subsistemas do edifício - esse item está ligado ao anterior, pois é necessário considerar a maneira como os materiais e os componentes são interligados e como podem ser desmontados sem que se danifiquem (HERIQSON; ROCHA e SATTLE, 2008; GUY e SHELL, 2002; CROWTHER, 2005; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C15. Evitar que sistemas elétricos e hidráulicos fiquem embutidos - em muitas construções, os sistemas elétricos e hidráulicos são embutidos nas paredes de alvenaria, assim, para removê-los, é necessário danificar as paredes e, em muitos casos, os próprios sistemas também. Quando o sistema for embutido é necessário prever compartimentos visitáveis (GUY e SHELL, 2002; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C16. Concentrar os sistemas hidráulicos e elétricos no mesmo local - Ponto central para facilitar a desmontagem e a manutenção (GUY e SHELL, 2002);

3. Conexões

Analisar como serão as conexões também é imprescindível, pois pode tornar o processo de desmontagem mais rápido e eficiente, bem como garantir o desmonte não destrutivo dos materiais. Durmisevic e Noort (2003) apresentam algumas conexões na ordem das que mais contribuem para as que mais danificam os materiais:

- Encaixadas;

- Conectores com acessórios externos;
- Conectores com acessórios integrados;
- Conectores integrados;
- Peças com dispositivos para conexões integradas;
- Ligações químicas.

As conexões feitas por meio de encaixes são as que menos danificam as peças do edifício quando é necessário o desmonte. A utilização de acessórios externos ou outras peças (pregos, parafusos, etc.) para unir os elementos, por sua vez, podem danificar as peças na desmontagem. Já quando são usadas ligações químicas (cola, argamassa, etc.), os materiais são ainda mais danificados na desmontagem, dificultando, ou até impossibilitando o seu reuso e reciclagem.

Como os edifícios são compostos por diferentes subsistemas, materiais e componentes, é fundamental considerar como são feitas as suas conexões.

Critérios para a Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem Relativamente às Ligações e Conexões:

C17. Unir os materiais e elementos de maneira que facilite o processo de desmontagem - considerar as ligações e conexões é um ponto fundamental para facilitar a futura desmontagem do edifício (SANTINI, HERMAN, 2010; ROMEIRO FILHO, 2010);

C18. Evitar ligações químicas, utilizando pregos, parafusos e conectores - quando as ligações são feitas por argamassas ou cimento, por exemplo, provavelmente os materiais serão danificados. O uso de pregos, parafusos e conectores podem provocar pequenos danos nos elementos, no entanto, ainda assim é possível haver reutilização. A situação ideal seria tentar encaixar os componentes do sistema construtivo para que as diversas peças não sejam danificadas (HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008; CROWTHER, 1999; GUY e SHELL, 2002; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C19. Facilitar a ligação dos elementos e montagens dos componentes - as ligações podem ser facilitadas quando se utiliza ferramentas de

fácil manuseio e precisa-se de poucos trabalhadores (WEBSTER; COSTELLO, 2005; GUY; SHELL, 2002; YUBA, 2005);

C20. Propor ligações independentes - dessa maneira, é possível desmontar os elementos sem interferir em outras partes da estrutura (HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008; CROWTHER, 2005);

C21. Utilizar conectores que resistam à montagem e desmontagem - alguns conectores podem se romper com a montagem e a desmontagem, não podendo, portanto, ser reutilizados (HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008; GUY e SHELL, 2002; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C22. Padronizar os conectores - é importante para tornar a desmontagem mais rápida e eficiente, pois são utilizadas as mesmas ferramentas e o mesmo número de profissionais;

C23. Reduzir o número de conectores - Quantos menos conectores, mais rápida poderá ser a desmontagem. Prever a construção com conectores fáceis de serem removidos, de maneira prática e menor quantidade ajuda na desmontagem (WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C24. Prever possibilidades de reuso dos conectores - é importante considerar a reutilização dos conectores, para que se diminua a quantidade de resíduos na desmontagem (HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008; WEBSTER; COSTELLO, 2005);

4. Materiais e Componentes

Analisar os materiais e componentes é fundamental, pois influencia diretamente no resultado da desmontagem. Alguns materiais podem facilitar ou dificultar o processo, portanto, é necessário considerar a maneira em que serão conectados aos edifícios, além das características de seu ciclo de vida.

É importante considerar a análise do ciclo de vida do edifício e dos materiais utilizados para analisar o impacto ambiental causado por todas as etapas da construção, da utilização e da desmontagem. Além disso, deve-se priorizar a reutilização à reciclagem para evitar a remanufatura.

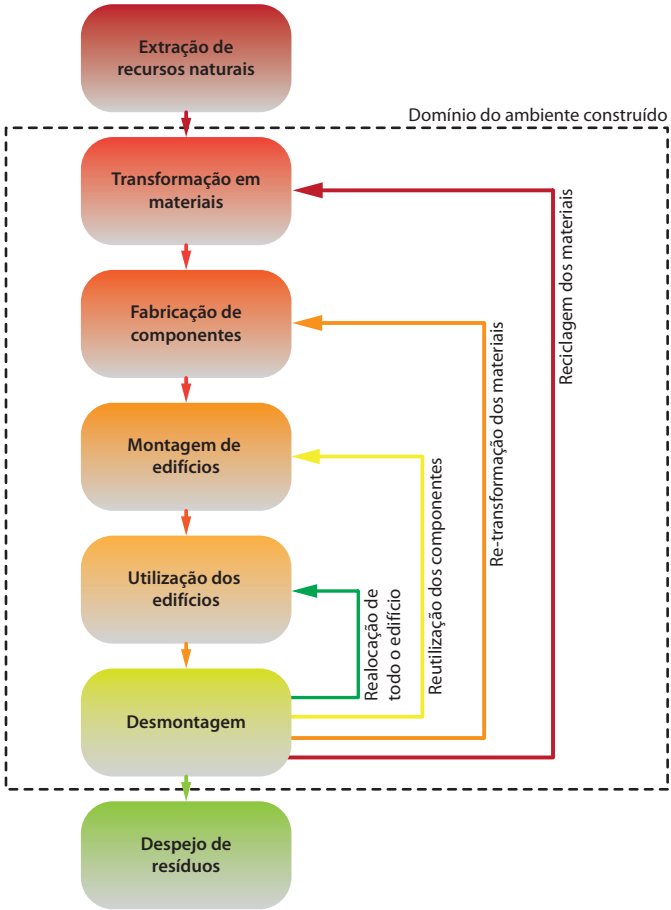


Figura 2. Possíveis cenários para o fim de vida do edifício. Adaptado de (CROWTHER, 2001).

Os sistemas construtivos que são convencionalmente constituídos de concreto armado ou estruturas metálicas com paredes de alvenaria que contêm canalizações embutidas para a fiação elétrica não possuem uma fácil desmontagem, e o tipo e a quantidade de componentes de construção recuperáveis é limitado. As ligações com argamassa que são utilizadas em conexões estruturais e não estruturais são a principal razão para a dificuldade da desconstrução. A severa queda na qualidade dos materiais reciclados e o uso de argamassa de cimento em muitas das articulações não estruturais são alguns dos motivos de impossibilidade na reciclagem de determinados materiais (SAGHAFI; TESHNIZI, 2011).

Os materiais e componentes descritos a seguir (madeira, aço, alvenaria, e concreto) são alguns dos mais encontrados nos edifícios na atualidade. É importante refletir como os seus sistemas construtivos podem facilitar no desmonte, e como se pode melhorar a eficiência do processo de reutilização e reciclagem dos elementos que tais materiais constituem.

4.1. Madeira

A madeira é um recurso natural renovável e, como tal, pode ter um impacto ambiental muito baixo quando comparado a outros materiais e, desde que bem especificada e utilizada, há uma grande possibilidade de reutilização, o que contribui para a redução da poluição ambiental do setor da construção. O crescimento da reutilização de itens de elevado valor, como grandes seções de vigas e pisos de madeira, os quais tem potencial para aumentar significativamente a quantidade de madeira adequada para a reutilização na construção, torna-se positivo do ponto de vista ambiental (HOBBS; HURLEY, 2001).

É importante que se utilize madeira com certificado de origem, a fim de não se contribuir com o desmatamento de florestas naturais. Ao ser certificada, a madeira recebe um selo que fornece informações sobre a classe de resistência, o grupo e a origem das espécies. Essas informações podem ser usadas para assegurar que a madeira se encontra certificada por um perito (HOBBS; HURLEY, 2001).

Muitos componentes de madeira que são recuperados a partir de estruturas existentes contêm pregos e parafusos que devem ser removidos antes da reutilização ou reciclagem, esse processo é bastante demorado, visto ser realizado manualmente. E, em geral, apenas se revela economicamente viável para itens de alto valor, tais como grandes seções de vigas. Muitos componentes de menor valor terão de estar livres de pregos e parafusos, para que possam ser reciclados na produção de novos elementos (HOBBS; HURLEY, 2001).

Os sistemas de madeira estrutural têm um alto potencial para o reuso no fim de vida útil de um edifício. Existem exemplos de novas estruturas construídas com a utilização em abundância de madeira recuperada. Infelizmente para os engenheiros estruturais, grande parte dessa madeira recuperada não acaba em estruturas, em vez disso é serrada para pisos, móveis ou outros acabamentos,

dificultando, deste modo, a sua futura reutilização como madeira estrutural (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

As grandes madeiras são uma fonte comprovada de aproveitamento estrutural. A dimensão de madeira serrada provou que extrair a dimensão intacta é um processo demorado. O processo de desmontagem deve ser realizado com o máximo de cuidado para evitar danificar o material. Os riscos mais frequentes no processo de desmonte são os recortes e danificação das extremidades ao se retirar e transportar os materiais. Por vezes, os detalhes técnicos da construção obrigam a realização de recortes nos materiais para o seu desmonte. As ligações são outro fator que também complicam o seu desmonte, em vez de pregos, parafusos e porcas, que são mais difíceis para remover, podem ser especificadas ligações de encaixe (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

A madeira é um material altamente preferível em um projeto para a desconstrução, desde que seja flexível tanto para a reutilização como para a reciclagem. É um material "natural" e pode ser prontamente conectado por diversos dispositivos de conexões e encaixe (GUY; SHELL, 2002).

4.2. Aço

A indústria siderúrgica causa grave impacto ambiental. Após a demolição, parte do aço utilizado pode ser reciclado, no entanto, é importante buscar soluções para que esse material seja reutilizado sem que precise ser reciclado, devido à grande quantidade de energia requerida no processo.

O desafio será aumentar a quantidade de aço a reutilizar, em vez de reciclá-lo. Apesar do seu elevado potencial de reciclagem, esse processo consome muita energia. Isso impõe a necessidade de incorporar um projeto para o desmonte em novos edifícios e desenvolver novas ferramentas e técnicas para maximizar a reutilização dos materiais de edifícios existentes por meio desse processo (HOBBS; HURLEY, 2001).

Criar ligações aparafusadas simplifica a desmontagem, em contrapartida ligações soldadas oferecem a vantagem de exigir menos modificações nos materiais, tais como os orifícios dos parafusos. Já o aparafusamento simplifica o processo de desmonte. Além disso, é necessário desenvolver outras tecnologias que permitam a conexão entre materiais no intuito de minimizar as modificações de fabricação, tais como furos, encaixes ou prensas. Selecionar

tamanhos padronizados e geometrias de conexão que minimizam o uso de reforços e de outros acessórios soldados também facilita a reutilização do aço. Outro processo possível de ser explorado seria o estabelecimento de um *kit* de acessórios para ser utilizado nos edifícios com estruturas de aço. A ideia seria a de limitar o número de formas e comprimentos utilizados na construção civil e estabelecer regras de conexão e os tipos de materiais que permitam a reutilização sem qualquer modificação adicional (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

O fornecimento de uma ferramenta para a remoção automatizada dos parafusos e conexões poderia aumentar o número de seções disponíveis para a reutilização, em vez da reciclagem. Os métodos atuais para a remoção de feixes são suscetíveis de conduzir a uma distorção na proximidade da ligação, com um requisito para cortar o aço no solo. A indústria de demolição desenvolveu trituradores e pulverizadores para permitir o reforço do vergalhão a ser removido a partir de estruturas de concreto armado. Também houve a recente evolução do guindaste, desenvolvido para a demolição de edifícios altos, que permite o corte ao girar até 360 graus, provocando o cisalhamento nos materiais (HOBBS; HURLEY, 2001).

4.3. Alvenaria

A alvenaria tem uma longa história de reutilização. A pedra natural usada em edifícios antigos foi muitas vezes reutilizada em novas construções. Além disso, ela pode sempre voltar para a pedreira e ser cortada como se fosse uma nova pedra, pois tem uma elevada durabilidade e é fácil de ser desmontada se for assentada com argamassas de cal ou conexões de encaixe (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

O tijolo também é um dos materiais mais populares disponível como material recuperado por ser resistente e ter uma aparência confortável e acolhedora, além da facilidade da produção em massa. A razão para ser recuperado com sucesso é que as argamassas de cal são as mais suaves e podem ser facilmente removidas. Infelizmente, é extremamente difícil separar quando a argamassa foi produzida com cimento *Portland*. Além disso, quando parte da construção de alvenaria é reforçada em aço, o processo é dificultado e o material pode ser danificado. Os códigos de construção exigem que a alvenaria estrutural em regiões sismicamente ativas seja reforçada para tornar a construção mais segura durante os terremotos. O reforço é tipicamente incorporado com

argamassa de cimento *Portland*, o que torna impossível reutilizar qualquer um dos materiais constituintes (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

4.4. Concreto

O concreto é um dos materiais estruturais mais desafiadores quando se trata de projetar para reutilização futura. É difícil imaginar como os constituintes do concreto moldado poderão ser recuperados. A sua estrutura é formada por um conjunto contíguo, sem junções convenientes em que possam ser separadas. Os elementos estruturais são pesados e difíceis de transportarem. Os componentes estruturais têm, muitas vezes, um *design* personalizado para a sua aplicação. E é impossível ver como os membros são reforçados a partir do exterior, de modo que o engenheiro, no futuro, não terá a informação sobre como será a sua manutenção e reutilização. A melhor opção para concreto, hoje em dia, será a reciclagem. O concreto pré-moldado oferece maior potencial de reutilização do que o concreto moldado no local. Os pré-fabricados vêm frequentemente em tamanho padrão e com quantidades padrão de reforço (WEBSTER; COSTELLO, 2005).

Na maioria dos edifícios com estrutura em concreto, são colocadas armações em aço no local e, portanto, precisam ser demolidos destrutivamente. Os elementos de concreto não podem, dessa forma, ser reutilizados na sua forma original. Por outro lado, as armações no concreto pré-moldado incorporado em vigas, pilares, lajes de escada e alveolares são mais simples de serem desmontadas, já que as articulações são simplesmente suportadas. Uma barreira que existe, entretanto, é a de não haver nenhuma norma sobre os sistemas de articulação, além de não serem projetados considerando seu desmonte, embora estejam sendo desenvolvidos métodos novos e inovadores e que, esperançosamente, incluem sistemas de desmontagem de juntas. Os sistemas de pavimento pré-moldado são frequentemente usados e são, talvez, os mais simples dos componentes do concreto a serem desmontados e reutilizados. No entanto, eles são por vezes cobertos com uma camada de concreto de 50 mm, moldada no local, o que significa que é necessário recorrer à demolição destrutiva. As vigas pré-moldadas são frequentemente pré ou pós-tensionadas e podem ser muito perigosas para demolir, pois necessitam de cuidados especiais (HOBBS; HURLEY, 2001).

A alta pressão do jato de água, presente na técnica mais conhecida como hidrodemolição, é frequentemente usada para cortar concreto em situações

de reparação e deixa tanto o aço de reforço como o concreto circundante limpos e reutilizáveis. A lança térmica e outros métodos de demolição de aquecimento poderiam ser mais amplamente utilizados no futuro, como a aplicação de técnicas que cortam concreto armado, deixando uma maior parte do elemento intacto. No entanto, existe um crescimento na área da reutilização de componentes de concreto na sua forma original. Um exemplo disso é a pavimentação de blocos de concreto que está sendo usada cada vez mais nas calçadas, parques e estacionamento. Tais blocos podem ser desmontados e reutilizados rapidamente e com baixo custo quando necessário (HOBBS; HURLEY, 2001).

O concreto tem uma grande durabilidade como material estrutural e resistência à compressão. É utilizado como reforço para a formação de pavimentos e elementos integrantes e também pode atuar como envolvente e acabamentos do edifício. Esse material é altamente reciclável, mas não é fácil de ser reaproveitado quando está contaminado por outros componentes de construção. Assim, é necessário avaliar os custos para removê-lo, com a finalidade de reciclar os componentes de concreto, a menos que sejam utilizados meios mecânicos (GUY; SHELL, 2002).

A indústria cimenteira já considera o foco ambiental como parte de sua estratégia competitiva, valorizando economicamente os seus resíduos e diversificando o seu mercado consumidor. Esse interesse levou à construção da primeira fábrica brasileira de cimento que não dispõe de forno próprio para a produção de clínquer a cimento Mizu. Essa fábrica opera produzindo cimento CPIII que é adquirido pelo Oriente e também pelo mercado nacional. Os efeitos ambientais desse tipo de cimento são substancialmente menores do que os gerados pelo cimento *Portland* comum, significativamente perceptíveis quando se avalia o ciclo de vida do novo cimento. Notadamente, as emissões ao meio ambiente e o consumo de matérias-primas são reduzidos. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

Critérios para a Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem Relativamente aos Materiais e Componentes:

C25. Considerar a desmontagem dos materiais utilizados na edificação para aumentar as chances de reutilização – é importante aumentar o ciclo de vida dos materiais usados nas edificações, posto que isso consequentemente reduz o desperdício e a poluição, além de contribuir

para a economia dos recursos naturais na fabricação de novos produtos (CROWTHER, 1999; CROWTHER, 2005, GUY e SHELL, 2002);

C26. Padronizar os materiais - torna mais prática a desmontagem. Muitos materiais, como revestimentos, não são padronizados e mudam muito ao longo dos anos; além de dificultar a manutenção também atrapalha na desmontagem;

C27. Considerar os diferentes ciclos de vida - com intuito de programar o melhor momento para substituir os diferentes materiais e evitar que prejudiquem os outros na desmontagem (CROWTHER, 2005; GUY e SHELL, 2002);

C28. Evitar materiais tóxicos e danosos - Alguns materiais, como tintas específicas, podem contaminar o ambiente interno e até mesmo outros materiais. Além disso, podem poluir o meio ambiente se forem descartados de maneira incorreta (WEBSTER; COSTELLO, 2005; GUY; SHELL, 2002; ROMEIRO FILHO, 2010);

C29. Incentivar a reutilização de materiais de outras construções - diversos materiais, como as madeiras, telhas e peças metálicas, podem ser reutilizados, pois muitas vezes a obra foi demolida não porque estava degradada, e sim por outros motivos, como alteração de uso. Dessa maneira, é possível reutilizar diversos materiais, sem que precisem ser reciclados (WEBSTER; COSTELLO, 2005; HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008);

C30. Considerar as dimensões e pesos dos materiais para facilitar o desmonte e o transporte - É importante utilizar materiais de fácil manuseio, transporte e armazenamento para que o processo se torne viável (HERIQSON; ROCHA e SATTLE, 2008; GUY e SHELL, 2002; CROWTHER, 1999);

C31. Considerar materiais que facilitem a desmontagem - a estrutura metálica aparafusada, por exemplo, é mais fácil de ser desmontada e reutilizada do que a estrutura de concreto armado moldado no local. Esta se torna difícil de ser separada, sobretudo sem que sofra danos que impeçam sua reutilização. As estruturas de madeiras também podem ser muito bem reaproveitadas, principalmente se forem encaixadas,

uma vez que, dessa forma, não se danificam tanto na desmontagem. Os acabamentos, por sua vez, quando estão encaixados, como os assoalhos de madeira e pisos vinílicos, possuem remoção facilitada em comparação ao porcelanato assentado com argamassa. Também no caso da construção em pedra natural com fixação em argamassa de barro, a desmontagem é muito produtiva, pois permite que se reutilize a pedra natural e que a argamassa se desfaça. No entanto, nas construções com concreto armado moldado no local, o ato de desmontar é mais complicado, pois a estrutura torna-se uma única peça difícil de separar, desmontar, transportar, armazenar e até mesmo reciclar. Nesse caso, é pouco provável a reutilização (WEBSTER; COSTELLO, 2005);

C32. Utilizar materiais duráveis e resistentes - muitos materiais podem ser danificados na desmontagem, portanto, devem ser resistentes para que não percam as suas funções mecânicas (WEBSTER; COSTELLO, 2005, GUY; SHELL, 2002; HERIQSON; ROCHA e SATTLER, 2008);

5. Informação\Identificação dos Materiais

Um dos meios para projetar para a desmontagem é agilizar a compreensão e a viabilidade de uma sequência de desmontagem, tanto para elementos de construção, como para todo o edifício. É necessária a criação simultânea de um plano de desmontagem, juntamente com um plano de construção e a rotulagem de componentes dos materiais que constituem a edificação, contribuindo significativamente com o processo. Vincular aos produtos uma etiqueta plástica com códigos numéricos para indicar o tipo de plástico, por exemplo, fornecendo instruções para a disposição de materiais, auxiliando o contratante e o processo de desmonte (GUY; SHELL, 2002).

Critérios para a Avaliação do Potencial de Desmonte e Reciclagem Relativamente à Informação e Identificação dos Materiais:

C33. Especificar os materiais que possam ser identificados - a identificação dos materiais é um ponto importante, pois facilita a remoção, venda e reutilização. Diversas tecnologias estão a ser desenvolvidas para que os materiais sejam identificados com mais precisão. Questões sobre

o ano em que foram fabricados, de onde vieram, qual o consumo de dióxido de carbono (CO_2) e até mesmo sobre as propriedades mecânicas que possuem, facilitam na programação da reutilização dos materiais (WEBSTER e COSTELLO, 2005; GUY e SHELL, 2002; CROWTHER, 1999);

C34. Numerar e identificar os conectores para facilitar a montagem e evitar perdas – os projetistas devem documentar os pontos de desmontagem e manter os documentos atualizados para acelerar o processo de desmontagem, pois isso auxilia na racionalização da desmontagem e remoção do processo (CROWTHER, 1999; CROWTHER, 2005; GUY e SHELL, 2002; WEBSTER e COSTELLO, 2005);

C35. Atualizar as informações de projeto - visto que pode haver divergências entre o que foi construído e o que foi projetado, é importante guardar com segurança o projeto "as built" (WEBSTER; COSTELLO, 2005);

Ao considerar estes critérios ao longo do desenvolvimento do projeto, é possível obter melhores resultados na desmontagem, além de diversas outras vantagens. Para Crowther (1999) algumas delas são: a redução do consumo de recursos naturais, a redução da perda de espécies e *habitats*, a redução na geração de resíduos e poluição, além da melhoria da saúde humana e das condições sociais.

Por fim, é necessário repensar sobre o desenvolvimento do projeto e não apenas projetar para que dure o maior tempo possível, pois em muitos casos os edifícios são demolidos porque o contexto urbano e as necessidades mudaram e não somente porque os materiais estavam degradados. Dessa maneira, é possível avaliar melhor os sistemas construtivos inovadores, para que não agravem ainda mais a poluição do meio ambiente. Prever soluções para facilitar a montagem pode tornar a construção mais rápida e eficiente, além de contribuir para a manutenção do edifício. Ao considerar possibilidades para facilitar a desmontagem, é possível reduzir o grande número de materiais desperdiçados, e assim, aumentar a possibilidades de reciclagem e até o reuso dos sistemas e materiais que compõe a edificação.

Considerar o DfD é importante também para diminuir o tempo e o custo da desmontagem, pois apenas questões sustentáveis não são suficientes para convencer empresas e clientes a optarem pela desmontagem no lugar da demolição, que é mais rápida. Portanto, é preciso possibilitar a desmontagem

em um curto prazo e ainda proporcionar a obtenção de lucro com a revenda dos materiais para tornar esse processo mais atrativo.

6. *Checklist* de Caracterização

A Tabela a seguir foi desenvolvida com base nas diretrizes discutidas anteriormente com o intuito de orientar os técnicos de uma Instituição Técnica Avaliadora (ITA) na caracterização e avaliação preliminar do potencial de um sistema construtivo inovador. Apresenta como solução a desmontagem não destrutiva dos seus elementos e de reaproveitamento ou reciclagem de seus componentes e materiais constituídos.

A *checklist* também pode orientar os desenvolvedores de sistemas construtivos inovadores na realização de Projetos para o Desmonte do sistema e também pode ser utilizada pelos projetistas de arquitetura e engenharia com o intuito de avaliar as possibilidades de desmonte do sistema construtivo a ser projetado ou caracterizado.

Além disso, a *checklist* é um importante documento que pode ser utilizado no momento da desmontagem, pois demonstra as características do sistema construtivo que foram consideradas em relação ao DfD.

O ideal é que se tenha o maior número de "atende" possíveis, para que facilite a desmontagem. A *checklist* pode passar por alterações, acréscimo itens e observações, conforme o desenvolvimento do projeto.

Checklist para Caracterização de Sistema Construtivo Quanto à Facilidade de Desmonte

Sistemas construtivos	Critérios referidos	Atende	Não atende	Não se aplica	Não verificado
Projeto para o desmonte	**C1, C13**				
Sistema Construtivo Modular	**C9**				
O sistema evita elementos de grandes dimensões	**C11**				
Elementos pré-fabricados	**C10**				
Estrutura resistente a montagem e desmontagem	**C21, C32**				
Adoção de sistemas construtivos abertos	**C7**				
Evita junção de vários sistemas construtivos	**C8**				
Evita subsistemas embutidos	**C15**				
É possível acessar todas as partes das edificações	**C7**				
É possível desmontar com ferramentas manuais	**C4, C19**				
Foi considerado o transporte dos elementos e materiais desmontados	**C11,**				
É possível desmontar partes separadas do sistema construtivo sem danificar outras	**C6, C13**				
A desmontagem dos subsistemas são independentes	**C14, C20**				
Foi considerado o tempo ideal de desmonte	**C5**				
Foi prevista a sequência do desmonte na documentação do sistema construtivo	**C1, C13**				
Foi considerado o custo da desmontagem	**C5**				
Elementos a serem desmontados são compatíveis com a escala humana	**C11**				
Todos os elementos do sistema construtivos apresentam baixa toxicidade	**C28**				

Fonte: adaptado de Mattaraia, 2013.

Checklist para Caracterização de Sistema Construtivo Quanto à Facilidade de Desmonte

Ligações e conexões entre componentes	**Critérios referidos**	**Atende**	**Não atende**	**Não se aplica**	**Não verificado**
Ausência de ligações químicas	**C18**				
Conectores resistentes	**C21**				
Conectores padronizados	**C22**				
Ligações independentes	**C20**				
Reuso dos conectores	**C24**				
Número reduzido de diferentes tipos de conectores	**C23**				
Conectores numerados segundo a ordem de desmontagem	**C17, C34**				
Materiais e componentes	**Critérios referidos**	**Atende**	**Não atende**	**Não se aplica**	**Não verificado**
Materiais padronizados	**C26**				
Disponibilidade de inventários ACV dos materiais utilizados	**C27**				
Ausência de materiais tóxicos ou danosos	**C28**				
Evita materiais compostos	**C31**				
Materiais leves	**C30**				
Materiais duráveis	**C32**				
Priorizou materiais que possam ser reutilizados	**C29**				
Os materiais utilizados poderão ser desmontados	**C25**				
Ausência de Revestimentos e acabamento químicos	**C31**				
Informação e identificação dos materiais	**Critérios referidos**	**Atende**	**Não atende**	**Não se aplica**	**Não verificado**
Indicação de composição dos conectores	**C33, C34**				
Identificação da composição de materiais e componentes	**C33, C34**				
Projeto e documentos com dados atualizados	**C35**				
Os pontos de desmonte estão identificados	**C34**				

Fonte: adaptado de Mattaraia, 2013.

Referências Bibliográficas

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V.M. *Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil,* 2001.

AMOÊDA, R. P. C. *Concepção para a desconstrução: abordagem energética à avaliação da efetividade da desconstrução.* 2009. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Portugal, 2009.

BREWER, G.; MOONEY, J. A best practice policy for recycling and reuse in building. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability,* v. 161, n. 3, p. 173-180, Sep 2008.

CROWTHER, P. Design for Disassembly - Themes and Principles. BDP *Environment Design Guide*, *2005*.

CROWTHER, P. Developing and Inclusive Model for Design for Deconstruction. In: CHINI, A. (Ed.) *CIB Task Group 39* - Deconstruction, Annual Meeting, 2001, April 2001, Wellington, New Zealand.

CROWTHER, P. Design for Disassembly to Recover Embodied Energy. *PLEA*. Austrália*,* 1999, 6 p.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios: a importância da etapa de projeto arquitetônico. *NUTAU*. São Paulo, 2002.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. *A Sustentabilidade ao Longo do Ciclo de Vida de Edifícios:* A Importância da Etapa de Projeto Arquitetônico. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

DURMISEVIC, E.; NOORT, N. Re-Use Potential of Steel in Building Construction. *Deconstruction and Materials Reuse*, CIB, Flórida, p. 352-361, 2003.

EDWARDS, S.; BENNETT. Construction products and life-cycle thinking. *UNEP Industry and Environment,* Reino Unido, p. 57-65, abr-set 2003.

GEHIN, A.; SWOLINSKI, P.; BRISSAUD, D. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, França, v.16, p. 566-576, 2008.

GO, T. F. et al. Disassemblability of end-of-life vehicle: a critical review of evaluation methods. *Journal of Cleaner Production*, v.19, p. 1536-1546, set. 2011.

GUY, B.; ROCHA, C. A building lifecycle model based on a design for deconstructions approach. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO*, IV., 2005, Porto Alegre.

GUY, B.; SHELL, S. Design for Deconstruction and Materials Reuse. *CIB Publication,* Rotterdam (Netherlands), 272, 20p., 2002. Disponível em: < http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB951.pdf>. Acesso em: fev. 2012.

HENRIQSON, J.; ROCHA, C.; SATTLER, M. Análise e Descrição do Processo de Demolição de Edificações. *ENTAC*. Fortaleza, 12*,* 10 p., 2008.

HOBBS, G.; HURLEY, J. Deconstruction and the Reuse of Construction Materials. CIB: Deconstruction and Materials Reuse: Technology, Economic, and Policy, TaskGroup 39: Deconstruction Meeting, 2001, p. 98-124.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil:* contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 2000.

KLOHN, S. C.; FERREIRA, N. F. Sustentabilidade e design para desmontagem – estudo de caso. IN: *Congresso Internacional de Pesquisa em Design*, 5. 2009, Bauru.

KIBERT, C.J.; CHINI, A.R. Introduction: Deconstruction as an essential component of Sustainable Construction. CIB: Overview of Deconstruction in Selected Countries, TaskGroup 39: Deconstruction, 2000, pp. 6-13.

LEE, H. B.; CHO, N. W.; HONG, Y. S. A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly under environmental regulations. *Journal of Cleaner Production,* v. 18, n. 13, p. 1276-1283, Sep 2010.

MATTARAIA,L.F. *Arquitetura e Sustentabilidade: Considerações sobre o Desmonte das Edificações.* 2013. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ROCHA, C. G.; SATTLER, M. A. A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, p. 9, 2009.

ROMEIRO FILHO, E. (Coord.). *Projeto do Produto*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 408p.

SAGHAFI, M.D.; TESHNIZI, Z.A.H. Building Deconstruction and Materials Recovery in Iran: An analysis of major determinants. *Procedia Engineering*. 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, v. 21, p. 853-863, 2011.

SANTINI, A. et al. Assessment of Ecodesign potential in reaching new recycling targets. *Resources Conservation and Recycling,* v. 54, n. 12, p. 1128-1134, Oct 2010.

SOARES, S. R.; SOUZA, D.M.; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: SATLER, M. A.; PEREIRA, F.O.R. (Eds.) *Coletânea Habitare*, v.7. Rio de Janeiro, 2000, 296p. Disponível em <http://habitare.infohab.org.br/ArquivosConteudo/ct_7_cap4.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2012.

TESSARO, A. B.; SÁ, J. S.; SCREMIN, L. B. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civl e demolição no município de Pelotas, RS. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 2, p. 10, 2012.

THORMARK, C. *Recycling Potential and Design for Disassembly in Building*. Lund, Suécia: KFS AB. 104p. 2001.

WEBSTER, M. D., COSTELLO, D. T. *Designing structural systems for deconstruction: How to extend a new building's useful life and prevent it from going to waste when the end finally comes.* Greenbuild, Conference, Atlanta, GA November, 2005.

YUBA, A. N. *Análise da pluridimensionalidade da sustentabilidade da cadeia produtiva de componentes construtivos de madeira de plantios florestais.* 213f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C012

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Construtivos

12

Cristiane Bueno
João Adriano Rossignolo

No que toca a avaliação dos sistemas construtivos, a análise dos sistemas existentes para certificação ambiental de edifícios revela que há raras ferramentas que avaliam desempenho ambiental objetivamente por ACV, predominando o reconhecimento de *atributos* de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado). O problema da abordagem por atributos é que eles são tratados isoladamente e perde-se a noção global do impacto (SILVA, 2007).

Existem diversos métodos e ferramentas para avaliação ambiental, alguns especificamente desenvolvidos como ferramentas de seleção, outros que podem funcionar como tal, mesmo sem terem sido originalmente criados com esse objetivo. A ampliação do leque de preocupações ambientais levou à consideração de emissões de resíduos e de uso e depleção de recursos naturais, que deveriam ser incorporados em uma estrutura de avaliação mais abrangente. Neste contexto, a ACV emergiu como um método reconhecido e que foi a base para a criação de diversas ferramentas de avaliação. Ao mesmo tempo, a complexidade dos produtos da construção civil, incluindo os materiais, sistemas, subsistemas e as inúmeras possibilidades de combinação desses elementos para a constituição de uma edificação, criou produtos mais complexos do que os bens de consumo que vinham sendo avaliados pela ACV (JOHN et al., 2006). A fim de analisar o impacto global das medidas de redução de consumo de recursos durante o período de vida de um edifício, a realização de uma avaliação de ciclo de vida do edifício como um todo demonstra ser uma metodologia de grande utilidade (VERBEECK; HENS, 2010b).

A ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) é aplicável a todos os níveis do sistema no setor da construção. Duas abordagens principais da ACV para

tais aplicações podem ser observadas: uma abordagem "de baixo para cima", centrada na seleção de materiais de construção, e uma abordagem "de cima para baixo", que considera todo o edifício como ponto de partida para futuras melhorias (ERLANDSSON; BORG, 2003).

A ACV foi desenvolvida principalmente para a concepção de produtos com baixo impacto ambiental. Como produtos, os edifícios são especiais porque têm uma vida relativamente longa, sofrem constantes alterações, muitas vezes têm funções múltiplas, contêm muitos componentes diferentes, são produzidos localmente, são normalmente únicos, causam impacto local, são integrados com a infraestrutura, etc., portanto, as fronteiras de seu sistema não são claras (BRIBIÁN et al., 2009).

Chevalier e Le Teno (1996) listam algumas das hipóteses que devem ser consideradas para a realização de uma ACV e analisam suas consequências sobre o significado dos resultados que elas produzem:

- **Estabilidade no tempo**: A primeira suposição feita em uma ACV é considerar o sistema de produção como um sistema estável no tempo. Essa hipótese permite que se obtenha apenas um retrato instantâneo do ciclo de vida do produto.

- **Separabilidade**: O método de ACV também assume que o sistema desenhado em torno de um produto é completamente independente de outros produtos fora do sistema.

- **Precisão**: Em terceiro lugar, supõe-se que nenhum fluxo pode ter mais de um valor exato.

- **Estado de equilíbrio**: Na maioria das vezes, o risco não é avaliado na ACV, o pressuposto aqui é o de que o sistema do produto está em estado de equilíbrio.

- **Modelo mundial, pontual e contínuo**: Supõe-se que todos os fluxos ambientais vem e voltam para a mesma fonte. O modelo de mundo também assume reagir continuamente a solicitações contínuas.

O desenvolvimento de estudos de ACV em edificações requer algumas alterações devido, entre outros aspectos, às diferenças apresentadas com relação ao ciclo de vida de produtos industriais que envolvem, normalmente, um curto espaço de tempo. Obras de engenharia, ao contrário de produtos com

vida útil de semanas ou meses, são, em geral, caracterizadas por uma vida útil que se estende por alguns anos, décadas ou mesmo séculos (SOARES et al., 2006). Em virtude do tempo de vida relativamente longo dos produtos de construção, a hipótese de estabilidade no tempo também pode produzir resultados altamente incertos (VERBEECK; HENS, 2010a).

Para minimizar a dificuldade de aplicação das metodologias convencionais de ACV ao setor da construção civil, Chevalier e Le Teno (1996), propuseram alguns requisitos especiais para a ACV de sistemas construtivos:

- Regras especiais de fronteira do sistema devem ser definidas para forçar a separabilidade;
- Processos específicos para sistemas construtivos devem ser modelados;
- A hipótese de estabilidade no tempo deve ser forçada ou cancelada;
- A hipótese de precisão tem que ser cancelada;
- A qualidade dos dados e as relações entre eles devem ser documentadas;
- A lista de estressores de impacto deve ser aberta aos critérios definidos pelo utilizador, de acordo com um processo de negociação bem documentado;
- Assistência deve ser prestada aos utilizadores para a gestão dos resultados;
- Um programa de computador deve ser utilizado para auxiliar todo o processo.

Algumas metodologias internacionais devem ser consideradas por sua grande representatividade de aplicação no âmbito internacional, como é o caso das EPDs (*Environmental Product Declarations* ou Declarações Ambientais de Produtos).

As EPDs, utilizando a norma francesa NFP01-010 (AFNOR, 2004) e baseando-se na avaliação de ciclo de vida dos materiais, oferecem uma análise ambiental e sanitária dos produtos industrializados, inclusive sistemas construtivos. Essas EPDs foram criadas para permitir a comparação e escolha de produtos, no entanto, apresentam limites de utilização, uma vez que fornecem informações que não permitem a comparação direta para a escolha de componentes de construção, primeiramente, porque os materiais de

construção em geral, não têm as mesmas funções e as mesmas aplicações em um edifício. Além disso, as informações fornecidas pelas EPDs são complexas demais para serem tratadas "à mão" (LEMAIRE et al., 2007). As EPDs buscam a comparação de sistemas dentro de uma mesma categoria e unidade funcional de construção e então estabelecem uma listagem padrão de critérios de emissão e consumo para a comparação de tais produtos dentro de seu ciclo de vida, de forma a uniformizar sua avaliação.

1. A Metodologia de ACV

De acordo com a NBR ISO 14040 (2009a), a ACV é a compilação e a avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida, considerando esse ciclo de forma holística. A Figura 1 representa esse ciclo, no qual são observados estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição ou geração da matéria-prima a partir de recursos naturais até a disposição final.

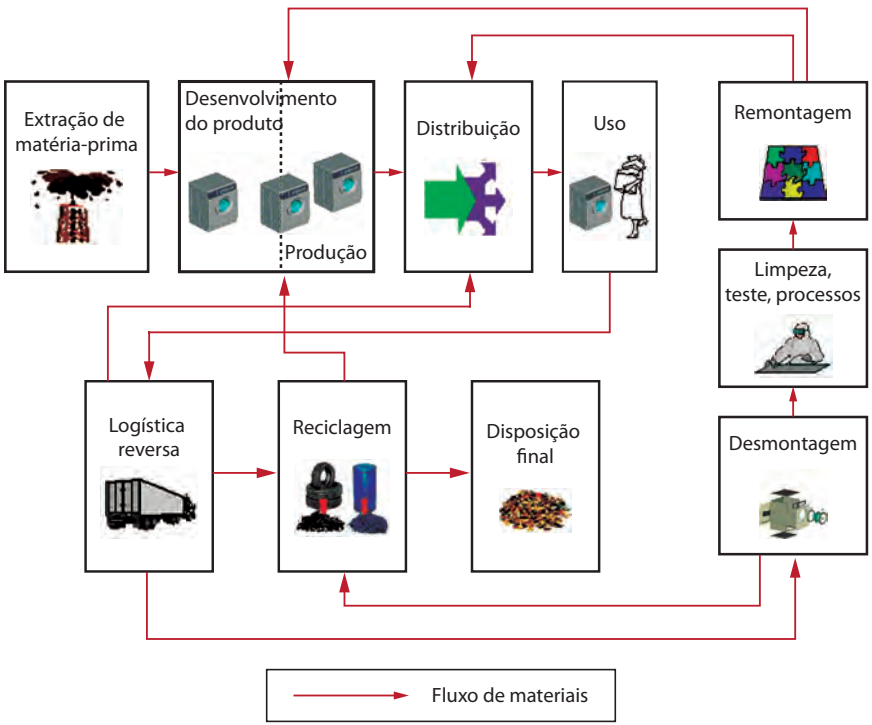


Figura 1. Ciclo de vida do produto. Fonte: Franke (2004).

Segundo a NBR ISO 14044 (2009b), um estudo de ACV deve ser composto por quatro fases (Figura 2): Definição de objetivo e escopo; Análise de inventário; Avaliação de impactos; Interpretação.

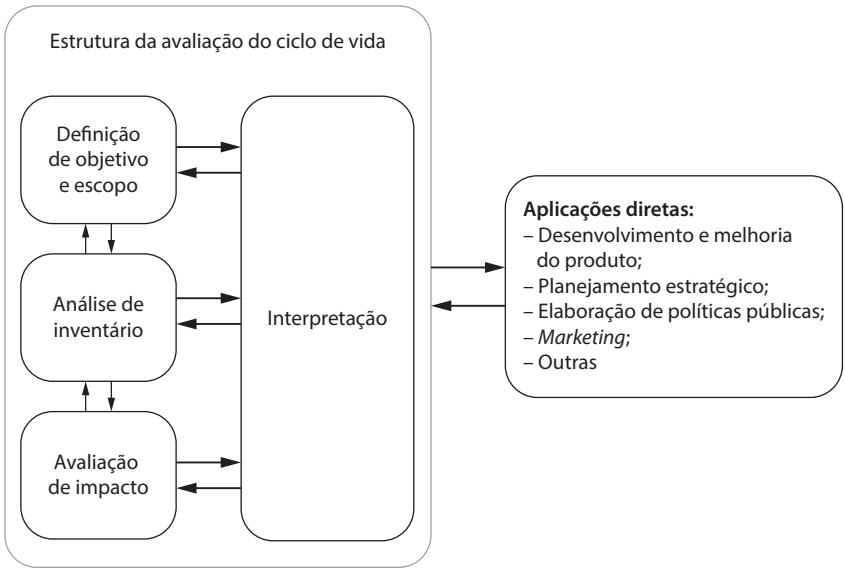


Figura 2. Fases de uma ACV. Fonte: NBR 14040 (2009a).

O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente dependendo do objetivo do estudo em particular.

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é a segunda fase de uma ACV. Trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão.

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV e tem por objetivo prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do estudo de ACV, na qual os resultados de um ICV ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e

discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.

Neste capítulo, os itens subsequentes serão utilizados para embasamento e detalhamento das fases de um estudo de ACV, o roteiro de aplicação da metodologia proposto pelo ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a), que se baseia nas normas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b). Para a etapa de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), as diversas metodologias existentes para avaliação de impacto serão brevemente apresentadas e discutidas com base em informações obtidas no ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b).

1.1. Definição de Objetivo e Escopo

1.1.1. Definição do Objetivo

A definição de objetivos é a primeira fase de qualquer ACV, independentemente se o estudo é limitado ao desenvolvimento de um único conjunto de dados referente a uma unidade de processo ou é um estudo de ACV completo de uma afirmação comparativa para ser publicada.

A definição do objetivo é essencial para todas as outras fases da ACV:

- Orienta todos os aspectos detalhados da definição do escopo, que, por sua vez, define a estrutura para os trabalhos de ACV e ICV;
- O controle de qualidade do trabalho é realizado tendo em vista os requisitos que foram determinados no objetivo do trabalho;
- Se o trabalho vai além de um estudo de ICV, os resultados finais da ACV são avaliados e interpretados em estreita relação com o objetivo do estudo.

Seis aspectos devem ser abordados e documentados durante a definição dos objetivos:

- Aplicação pretendida dos resultados;
- Limitações devido ao método, suposições e cobertura de impacto;
- Razões para a realização do estudo e contexto de decisão;

- Público alvo do estudo;
- Se é um estudo comparativo a ser divulgado ao público;
- Encarregados do estudo e outros atores influentes.

Finalmente, a fim de ajudar na definição do escopo, especialmente em relação à identificação da estrutura de modelagem e da abordagem metodológica do ICV, deve ser realizada uma classificação do contexto de decisão do estudo.

1.1.1.1. Aplicações Pretendidas

Em estudos de apoio à tomada de decisão e contabilidade/monitoramento, muitas vezes, várias aplicações separadas destinam-se a um mesmo estudo ou a aplicação é combinada com o custo, fatores sociais, ou outras informações ambientais complementares. Diferentes aplicações requerem diferentes abordagens metodológicas para a modelagem do ICV.

Estudos puramente metodológicos, sem relação com o suporte à decisão ou contabilidade/controle sobre o objeto de estudo, devem ser explicitados em seu objetivo de forma que não corra o risco de serem considerados pelo público como uma base para tomada de decisão relativa a produtos.

1.1.1.2. Limitações do Método, Suposições e Impactos

Suposições adotadas ou cobertura de impacto limitada devem ser claramente identificadas e, mais tarde, relatadas de forma proeminente, uma vez que podem interferir diretamente nos resultados do estudo.

Estudos com cobertura de impacto limitada têm restrições nas definições iniciais que podem resultar em incapacidade para comparações. Outras insuficiências metodológicas referem-se, por exemplo, às limitações que são inerentes ao ACV convencional ou às que podem ser causadas pela abordagem específica do método escolhido.

Suposições sobre as características do sistema analisado ou sobre cenários específicos também podem limitar a usabilidade e a reprodutibilidade dos resultados.

Estudos direcionados a nichos de mercado específicos podem diminuir inicialmente os tipos de produtos a serem incluídos no estudo de ACV,

embora, a partir de uma perspectiva puramente técnica, produtos fora do nicho específico também precisariam ser incluídos para evitar uma comparação potencialmente enganosa.

1.1.1.3. Motivos para Realização do Estudo, Contexto de Decisão e Público-alvo

Definir os direcionadores e motivações do estudo, e, especialmente, identificar o contexto de decisão são passos importantes do estudo. O contexto de decisão é um critério fundamental para determinar os métodos mais apropriados para o modelo de ICV e também determina diretamente outros aspectos-chave da definição do escopo, das decisões a serem tomadas durante a coleta de dados e modelagem, do cálculo dos resultados da avaliação de impacto, e, finalmente, para estudos de ACV, também da interpretação dos resultados.

A determinação do público alvo, entre outras coisas, ajuda a identificar as necessidades de revisão crítica e a forma adequada de apresentação do relatório e nível técnico de comunicação.

1.1.1.4. Comparações Destinadas a Serem Divulgadas ao Público

Nos casos em que o estudo de ACV tem como objetivo comparar duas ou mais alternativas para divulgação pública, deve-se manifestar de forma clara que "o estudo inclui uma afirmação comparativa e está previsto para ser divulgado ao público". Esse aspecto implica uma série de requisitos adicionais obrigatórios nos termos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) sobre a execução, revisão de documentação e relatórios do estudo ACV, devido às consequências potenciais dos resultados para, por exemplo, empresas externas, instituições, consumidores, etc.

Ainda, de acordo com a norma ISO 14044 (ABNT, 2009b), um estudo de ICV por si só não deve ser usado para afirmações comparativas destinadas a serem divulgadas ao público.

1.1.1.5. Encarregados do Estudo e Outros Atores Influentes

A definição de objetivo deve identificar quem encomendou o estudo de ACV e todos os seus financiadores. Além disso, outras organizações que

tenham qualquer influência relevante sobre o estudo devem ser nomeadas, o que inclui os especialistas em ACV que realizarão o estudo.

1.1.2. Definição do Escopo

O escopo de um estudo de ICV/ACV é sempre decorrente de seu objetivo, e os seguintes itens do escopo precisam ser claramente definidos:

- Os tipos de entregas do estudo de ACV, alinhados com a aplicação pretendida;
- Os sistemas ou processos que serão estudados e suas funções, unidade funcional, e fluxos de referência;
- Estrutura da modelagem do ICV e forma de manipulação de produtos ou processos multifuncionais;
- Fronteiras do sistema, requisitos de completeza e regras de corte;
- Categorias de impacto da AICV a serem cobertas e seleção de métodos específicos de AICV a serem aplicados, bem como – se incluído – normalização e ponderação de dados;
- Outros requisitos de qualidade de dados de ICV com relação à representatividade e adequação geográfica, tecnológica e temporal;
- Tipos, qualidade e fontes das informações e dados requeridos, e, especialmente, a precisão necessária e incertezas máximas permitidas;
- Requisitos especiais para comparações entre sistemas;
- Identificação do mix de energia utilizado para cada um dos processos dentro do ciclo de vida;
- Detalhamento do tipo de transporte utilizado para distribuição dos produtos e transporte de resíduos;
- Descrição dos cenários de fim de vida, gestão de resíduos, etc.;
- Identificação de necessidade de revisão crítica;
- Planejamento do relatório de resultados.

Dois requisitos transversais no estudo de ACV devem ser considerados devido a sua grande importância: a) Consistência dos métodos, hipóteses e dados; b) Reprodutibilidade.

Todos os métodos e premissas devem ser aplicados de forma suficientemente consistente em todas as fases do ciclo de vida, processos, parâmetros e fluxos do sistema analisado em conformidade com o objetivo do estudo. Isso também se aplica aos métodos de AICV e fatores de ponderação e normalização, se incluídos. Todos os dados do ICV devem ser suficientemente consistentes em termos de exatidão, precisão e integridade, e quaisquer inconsistências devem ser documentadas.

A reprodutibilidade de um estudo de ACV é uma avaliação qualitativa na medida em que a documentação dos métodos, suposições e dados/fontes de dados permitiria que um praticante independente reproduzisse os resultados do estudo e quaisquer conclusões ou recomendações formuladas.

1.1.2.1. Tipos de Entregas e Aplicações Pretendidas

Os tipos mais comumente produzidos de resultados são os seguintes, dos mais básicos aos mais complexos:

- Estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV);
- Resultados dos estudos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV);
- Modelo detalhado do ICV do sistema analisado.

É importante salientar que estudos comparativos a serem divulgados ao público sempre deverão ser estudos completos de ACV, com todas as suas etapas.

1.1.2.2. Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência

Duas definições muito importantes para o estabelecimento de um estudo de ACV são o "Fluxo de referência" e a "Unidade Funcional".

O fluxo de referência é o fluxo (ou fluxos em caso de processos multifuncionais) ao qual todos os outros fluxos de entrada e de saída quantitativamente se referem, ou seja, é o fluxo quantitativo relativo à unidade funcional definida.

Unidade Funcional é a unidade de referência para a quantificação do desempenho de um sistema de produto. É com base nessa unidade que será realizado todo o estudo de ACV.

Uma ou mais funções e unidades funcionais mensuráveis de cada um dos sistemas devem ser claramente identificadas. Muitas vezes, o objetivo do estudo de ACV determina qual das funções individuais de um sistema estará em foco e qual será o objeto analisado ou se o sistema todo é objeto da análise.

O primeiro passo para a definição da unidade funcional é a identificação e quantificação das propriedades mensuráveis relevantes e do desempenho técnico/funcional do sistema.

Os aspectos qualitativos relevantes também devem ser documentados, uma vez que podem ser decisivos para a aceitação do produto pelos usuários. Isso é necessário para assegurar que os produtos a serem analisados são realmente comparáveis.

A definição da unidade funcional deve, portanto, incluir os aspectos-chave quantitativos e qualitativos para evitar subjetividade na definição da equivalência dos produtos. No desenvolvimento de produtos, os conceitos de "propriedades obrigatórias" e "propriedades de posicionamento" são algumas vezes utilizados. As propriedades obrigatórias são características que o produto deve possuir para que o usuário perceba-o como um produto funcionalmente útil (incluindo requisitos legais). As propriedades de posicionamento, por outro lado, são características opcionais que podem ser utilizadas para posicionar o produto no mercado de forma mais atrativa do que outros produtos similares. A definição quantitativa da função do produto (assim como alguns aspectos qualitativos) será tipicamente baseada nas propriedades obrigatórias do produto, enquanto outros aspectos qualitativos, tipicamente relacionados à percepção do usuário, podem ser identificados dentre as propriedades de posicionamento.

A definição quantitativa da unidade funcional do produto deve ser baseada em normas técnicas sempre que possível e apropriado. No caso de falta de uma norma técnica aplicável e apropriada, é permitida e requerida a especificação de um meio apropriado, reprodutível e claramente documentado de mensuração da unidade funcional.

Nos casos em que uma unidade funcional relevante não for encontrada, torna-se necessária a identificação quantitativa e qualitativa do fluxo de

referência, assim como uma descrição detalhada do produto, a fim de que suas características mais relevantes possam ser identificadas.

Em processos multifuncionais, para cada função, uma unidade funcional e fluxo de referência devem ser identificados de forma apropriada, dependendo do tipo de cofuncionalidade. Caso contrário, especificações técnicas do processo e suas funções devem ser fornecidas. Para sistemas ou produtos com apenas uma função relevante (sistemas monofuncionais), a unidade funcional deve ser especificada, juntamente com um fluxo de referência, de forma clara e detalhada. Para sistemas multifuncionais com funções múltiplas e paralelas, devem ser fornecidas especificações técnicas detalhadas e a unidade funcional correspondente, assim como o fluxo de referência.

1.1.2.3. Estrutura de Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Na definição de escopo, uma decisão importante deve ser tomada em relação aos princípios e abordagens metodológicas do ICV que serão aplicados na modelagem do sistema. A modelagem pode ser atribucional ou consequencial, e a multifuncionalidade pode ser solucionada por alocação ou expansão/substituição do sistema. Essas escolhas trazem implicações para diversas seleções futuras, incluindo a forma como os dados de inventário deverão ser coletados e obtidos.

O modelo atribucional de ciclo de vida retrata sua cadeia de fornecimento real ou prevista, específica ou média, bem como a utilização e fim de vida da sua cadeia de valor. O sistema existente ou previsto é incorporado a uma tecnosfera estática.

O modelo consequencial de ciclo de vida retrata uma cadeia de fornecimento genérica tal como ela é teoricamente esperada em consequência da decisão analisada. O sistema interage com os mercados, e essas mudanças são retratadas de forma que uma demanda adicional para o sistema analisado deve ter uma tecnosfera dinâmica que está reagindo com essa demanda adicional. O objetivo é identificar as consequências que uma decisão no sistema em primeiro plano têm em relação a outros processos e sistemas da economia, tanto no sistema de segundo plano como em outros sistemas. O sistema analisado é modelado em torno dessas consequências, assim um passo fundamental na modelagem consequencial é a identificação dos processos marginais.

Quanto à multifuncionalidade, uma variante dos processos multifuncionais é o produto multifuncional, que é metodologicamente igual, mas normalmente é modelado de forma diferente em conjuntos de dados de ICV: enquanto cada cofunção dos processos multifuncionais anteriormente mencionados tem um fluxo de referência individual, no caso de produtos multifuncionais, normalmente, só um fluxo de referência é usado.

Diferentes abordagens são utilizadas para a resolução de multifuncionalidade. A escolha da abordagem mais adequada depende, entre outros fatores, do objetivo do estudo, dados e informações disponíveis e das características do processo ou produto multifuncional.

A forma mais adequada de resolver a multifuncionalidade deve ser identificada já na fase de escopo da ACV, pois afeta a identificação dos dados de inventário e outras informações necessárias. O problema da multifuncionalidade pode ser resolvido pelas seguintes abordagens:

- Subdivisão dos processos multifuncionais – refere-se à coleta de dados individualmente para os processos monofuncionais que se relacionam com o sistema analisado e que estão contidos no processo multifuncional;

- Expansão do sistema (incluindo substituição) – Pode-se resolver a multifuncionalidade expandindo as fronteiras do sistema e substituindo uma função não necessária por uma forma alternativa ou, quando vários sistemas multifuncionais devem ser comparados em um estudo, isso seria feito pela expansão das fronteiras do sistema, pela adição das funções faltantes e pelos inventários dos respectivos produtos monofuncionais. Expansão do sistema e substituição são as abordagens metodológicas correspondentes para a solução de multifuncionalidade na modelagem consequencial. Substituição significa subtrair o inventário de outro sistema do sistema analisado. Tal ação leva muitas vezes a fluxos de inventário negativo. Na prática, a expansão do sistema pode levar à necessidade de nova expansão do sistema à medida que os sistemas inclusos muitas vezes são novamente multifuncionais. Isso pode ser resolvido, em muitos casos, por regras de corte.

- Alocação – Resolve a multifuncionalidade pela divisão dos valores das entradas e saídas individuais entre as cofunções de acordo com algum critério de alocação.

Uma combinação específica da estrutura de modelagem do ICV (atribucional ou consequencial) e das abordagens metodológicas de ICV (alocação ou expansão do sistema) é identificada para cada situação de objetivo.

1.1.2.4. Obtenção das Fronteiras do Sistema e Critérios de Corte

As fronteiras do sistema definem quais partes do ciclo de vida e quais processos pertencem ao sistema analisado, isto é, são necessárias para a determinação de sua função, conforme definido pela sua unidade funcional. Uma definição precisa de fronteiras do sistema é importante para assegurar que todos os processos atribucionais e consequenciais sejam incluídos no sistema modelado e que todos os impactos ambientais potenciais sejam apropriadamente cobertos. Os níveis de critérios de corte e as incertezas máximas permitidas são as medidas chave para a qualidade geral dos resultados do estudo de ICV/ACV.

A ACV representa impactos relacionados a processos e produtos, mas não cobre, por exemplo, impactos de acidentes, derramamentos e impactos na saúde. Isso porque esses impactos ocorrem na tecnosfera e não estão sujeitos a qualquer destino ambiental e da cadeia de exposição. Se inclusos, eles devem ser inventariados, agregados e interpretados separadamente dos inventários de ciclo de vida, que dizem respeito a interações entre a tecnosfera e a ecosfera. Uma alternativa para a avaliação desses impactos é a aplicação de uma análise de risco, que poderia avaliar a possibilidade de incidência de tais eventos e as possíveis dimensões de seus impactos.

Para os conjuntos de dados de unidades de processo e fluxos de produtos e resíduos, a fronteira do sistema é aquela entre o processo modelado e o resto da tecnosfera. Para resultados de ICV e de conjuntos de dados de AICV, assim como para ACVs completas, as fronteiras do sistema devem ser determinadas de forma que todos os fluxos que as transpõem sejam exclusivamente fluxos elementares e de referência. Na realidade, mesmo para produtos simples, todas as atividades econômicas são de alguma forma parte do sistema. No entanto, o número de processos que contribuem em grau quantitativamente relevante para o sistema é normalmente bastante limitado. Na prática, todos os fluxos de produto, de resíduos e elementares que não sejam quantitativamente relevantes ou de referência podem ser ignorados.

Portanto, definir as fronteiras do sistema significa decidir quais estágios do ciclo de vida, tipos de atividades, processos específicos e fluxos elementares deverão ser inclusos e quais deverão ser ignorados no modelo de ciclo de vida. A definição qualitativa das fronteiras do sistema deve identificar aquelas partes do ciclo de vida que devem ser inclusas. A fronteira do sistema deve ser representada por um diagrama semiesquemático que mostre explicitamente quais partes do sistema e estágios de seu ciclo de vida estão inicialmente destinados a serem incluídos e excluídos.

A exclusão sistemática de transportes, infraestrutura, serviços, atividades administrativas, entre outros não é apropriada a menos que seja necessária de acordo com objetivos específicos do estudo de ACV. A necessidade de inclusão e possibilidade de exclusão de atividades apenas pode ser decidida para um dado caso tendo em vista o atendimento de requisitos de completeza e precisão dos resultados.

O critério quantitativo de corte define o valor de corte a ser aplicado para produtos, resíduos e fluxos elementares que cruzam a fronteira do sistema analisado, mas que não são quantitativamente incluídos no inventário. Em geral, todos os processos e fluxos que são atribuíveis ao sistema analisado devem ser incluídos nas fronteiras do sistema. Entretanto, nem todos esses processos e fluxos elementares são quantitativamente relevantes. Para os menos relevantes, dados de menor qualidade ou estimados podem ser usados, diminuindo os esforços para coleta e obtenção de dados de alta qualidade para aquelas partes. A definição quantitativa das fronteiras do sistema diz respeito à omissão admissível de estágios inteiros do ciclo de vida, tipos de atividades, processos e produtos específicos e fluxos elementares. Essas omissões, entretanto, apenas podem ser justificadas se forem insignificantes para o resultado do estudo. Ao lado do fluxo de referência que fornece a unidade funcional e fluxos de resíduos permitidos, nenhum outro fluxo relevante deve atravessar a fronteira entre o sistema analisado e o resto da tecnosfera, na medida do possível. E apenas os fluxos elementares devem cruzar a fronteira entre o sistema analisado e da ecosfera.

Os componentes de qualidade de dados interagem de forma multiplicativa e, tipicamente, os dados de qualidade mais fraca acabam por diminuir a qualidade geral dos dados. Portanto, um critério válido de corte deve ser definido baseando-se no grau quantitativo de completeza dos impactos ambientais gerais do sistema do produto.

1.1.2.5. Preparação do Embasamento para a Avaliação de Impacto

A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) agrega os dados obtidos nos inventários de forma a facilitar sua interpretação. Opcionalmente, a normalização e ponderação de tais dados também podem ser aplicadas para dar suporte a tal interpretação. Ao mesmo tempo, a avaliação de impacto também é necessária para o estabelecimento de critérios de corte e para avaliação de completeza.

As categorias de impacto ambiental cobertas na AICV, assim como as metodologias de AICV, normalização, agrupamento e ponderação, devem ser determinadas anteriormente à analise inicial do inventário para assegurar que dados relevantes sejam coletados.

Uma análise baseada em ICV, sem avaliação de impacto, pode, em alguns casos, ser justificada, dependendo do objetivo do estudo. Entretanto, é importante notar que esse tipo de análise pode limitar a interpretação dos resultados e comparações. Por esse motivo, em caso de estudos comparativos a serem divulgados ao público, afirmações baseadas apenas em ICV não são permitidas, de acordo com a norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

A seleção das categorias de impacto deve ser completa, abrangendo todas as questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema analisado. Dependendo da aplicação pretendida, pode ser decidido, durante a definição de objetivo, trabalhar com uma seleção limitada de categorias de impacto ambiental. A exclusão inicial de categorias de impactos relevantes deve ser claramente documentada e considerada na interpretação dos resultados, pois pode limitar consideravelmente as conclusões e recomendações do estudo.

Dependendo do objetivo do estudo e da natureza do sistema estudado, a inclusão de categorias ou fatores de impacto faltantes, que sejam relevantes para os resultados finais, pode ser necessária. Além disso, para estudos comparativos de ACV, também é importante que a adequação de metodologias genéricas de AICV seja discutida na fase de interpretação do estudo.

A normalização e agrupamento, de acordo com as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), são estágios opcionais, que visam a apoiar a interpretação do perfil de impacto, de forma a buscar um resultado completamente agregado. A fase de agrupamento exige

a normalização prévia, uma vez que o agrupamento sem prévia normalização pode fornecer resultados "mascarados".

Nos casos de afirmações comparativas a serem divulgadas ao público, assim como todos os outros estudos que visam a apoiar comparação de produtos por terceiros, a seleção final dos métodos de AICV a serem aplicados, tal como os níveis de avaliação (de ponto intermediário ou final), deve ser feita durante a definição inicial do escopo, da mesma forma que as decisões a respeito da possibilidade de inclusão das fases de normalização e agrupamento. Tais decisões devem ser documentadas de forma que permitam que, em uma futura revisão crítica, possa ser verificado o momento em que tais decisões foram tomadas.

1.1.2.6. Representatividade e Adequação dos Dados do ICV

Para que os dados de inventário possam representar de forma válida os impactos ambientais de um sistema, eles devem ter representatividade e adequação. A representatividade está relacionada à capacidade dos dados coletados representarem o inventário real do processo, abrangendo a coleta de dados relacionados à tecnologia, a geografia e o tempo. A adequação se refere ao grau em que os dados utilizados no modelo do sistema realmente representam o verdadeiro processo do sistema analisado.

A representatividade tecnológica de um processo ou sistema identifica quão bem os dados de inventários representam esse sistema/processo em relação às reais características técnicas ou tecnológicas documentadas nas informações descritivas do relatório.

Para o modelo atribucional, dados específicos relacionados à tecnologia da cadeia de fornecimento devem ser previstos para o sistema de primeiro plano, e médias do consumo de mercado, para o sistema de fundo. Esses são idealmente os dados primários e secundários dos fornecedores e dos usuários. Para o modelo consequencial, os mesmos dados devem ser previstos para o sistema de primeiro plano, incluindo-se as informações específicas de tecnologia de fornecedores para ligações contratualmente fixas ou planejadas da cadeia de fornecimento. As tecnologias marginais de curto ou longo prazo devem ser previstas para serem usadas no sistema de fundo.

A representatividade geográfica de um processo ou sistema identifica quão acuradamente os dados de inventário representam a localização do processo/

sistema em relação à sua operação, produção ou consumo. A abrangência geográfica dos dados de ICV deve representar a menor unidade geográfica apropriada, dependendo do objetivo do estudo e das aplicações pretendidas.

A necessidade de representatividade temporal é muito influenciada pela aplicação pretendida do estudo e seus requisitos em relação, por exemplo, à validade futura dos resultados e conclusões da ACV.

1.1.2.7. Tipos, Qualidade e Fontes dos Dados e Informações Requeridos

Durante a definição inicial de escopo e a preparação do trabalho subsequente, os principais tipos e fontes de dados e outras informações devem ser identificados, os quais serão mais detalhados e frequentemente revisados durante as fases iterativas de coleta de dados e modelagem de inventário, avaliação de impacto e interpretação. É recomendado preparar uma visão geral dos principais tipos de dados e informações que serão necessários, dependendo do tipo de entrega do estudo e determinar os requisitos gerais de dados e sua qualidade.

1.1.2.8. Comparação Entre Sistemas

Estudos envolvendo afirmações comparativas a serem divulgadas ao público devem atender requisitos adicionais para que tais comparações sejam válidas, justas e não enganosas. Isso reflete as consequências que o uso comparativo de resultados de ACV pode ter para outras empresas, instituições e partes interessadas, que não estão diretamente envolvidas no estudo.

Dois aspectos relacionados à questão do que está sendo comparado são importantes para esse tipo de estudo: a equivalência da unidade funcional das alternativas comparadas e a seleção não enganosa das alternativas.

Frequentemente, o contexto de aplicação dos produtos comparados também deve ser considerado como parte da unidade funcional, uma vez que produtos com a mesma unidade funcional geral podem ter desempenhos diferentes.

Dentre as propriedades de posicionamento, a durabilidade do produto tem um papel especial, estando diretamente relacionada à unidade funcional do produto. Por isso, a durabilidade deve ser considerada quantitativamente, usando-se a vida útil técnica das alternativas como base para afirmações

comparativas. Outras considerações sobre vida útil devem ser ponderadas na análise de cenários, como a vida útil de moda, a mecânica, a integridade, a inovação técnica, os custos, etc.

Assegurar a consistência dos métodos, pressupostos e dados usados no estudo de ACV para todos os sistemas comparados é de grande importância. Em estudos de comparação de sistemas, os requisitos gerais de qualidade de dados dependem da diferença relativa do impacto ambiental global entre os sistemas comparados. Nesses casos, com respeito à completeza, os critérios de corte devem ser aplicados para avaliação de impacto, mas também para massa e energia.

Estudos comparativos com base em indicadores ou categorias de impacto selecionadas devem destacar que a comparação não é adequada para identificar alternativas ambientais preferíveis, uma vez que só abrangem os impactos considerados.

1.1.2.9. Identificação da Necessidade de Revisão Crítica

Uma revisão crítica deve ser realizada por peritos que não estão envolvidos no estudo de ACV. Isso é geralmente benéfico para a qualidade e credibilidade, assim como para o valor do estudo. O tipo de revisão crítica requerida depende das aplicações pretendidas do estudo. É útil que, já durante a definição do escopo, seja decidido se uma revisão crítica será feita, por quem e de que forma será realizada. Essa decisão antecipada permite que a coleta de dados, documentação e relatório do estudo sejam adaptados para atender os requisitos da revisão, diminuindo o esforço global.

1.1.2.10. Planejamento da Comunicação do estudo

O relatório do estudo é um elemento vital de qualquer ACV. Sem documentação clara e efetiva para peritos e comunicação para os tomadores de decisão, as ACVs podem tornar-se subjetivas, acarretando em um uso errôneo e enganoso e não contribuindo para o melhoramento do desempenho ambiental. O relatório deve ser objetivo e transparente, e deve ficar claro o que foi ou não incluso no estudo, e quais conclusões e recomendações os resultados do estudo podem embasar. É importante que o relatório reflita claramente o estudo, podendo ter diferentes formas e níveis, dependendo de seus objetivos inicialmente estabelecidos.

1.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Os dados coletados durante a fase de inventário alimentarão todas as fases subsequentes do estudo de ACV, assim como servirão de *feedback* para as definições estabelecidas nas fases de objetivo e escopo, proporcionando parâmetros mais concretos para o ajuste dessas etapas. Assim, nessa fase, deve ser realizada a coleta de dados e modelagem do sistema, sempre de acordo com as definições do objetivo e escopo do estudo. É por esse motivo que essa é a fase que mais requer esforço e recursos em um estudo de ACV.

A fase de inventário envolve a coleta de dados para:

- Fluxos de entrada e saída dos processos: a) Fluxos elementares (como uso de recursos e emissões, mas também outras intervenções na ecosfera, como o uso do solo); b) Fluxos de produtos (bens e serviços que se apresentem como produtos de um processo e como entradas/insumos de outro) que liguem o processo analisado a outros processos ; c) Fluxos de resíduos (água residual, resíduos sólidos e efluentes) que precisam ser ligados ao processo de gerenciamento de resíduos para assegurar uma modelagem completa dos esforços relacionados e impactos ambientais;

- Outras informações identificadas na definição de escopo como relevantes para o sistema analisado incluem dados estatísticos, características de processos e produtos e todos os outros dados e informações, exceto aqueles diretamente relacionados à avaliação de impacto.

O tipo específico de trabalho a ser desenvolvido no inventário de ciclo de vida depende das entregas pretendidas do estudo. Ademais, nem todos os passos são requisitos para todo tipo de estudo. Dito isso, o trabalho de inventário de ciclo de vida, em geral, significa:

- Identificação de processos do sistema (modelagem atribucional ou consequencial);

- Planejamento da coleta de dados primários e conjuntos de dados de fontes secundárias;

- Coleta de dados do sistema de primeiro plano para os processos requeridos;

- Desenvolvimento genérico de dados de ICV, especialmente nos quais os dados médios ou específicos não estão disponíveis e não podem ser desenvolvidos tipicamente por restrições de acesso aos dados ou de orçamento;
- Obtenção de dados complementares, como processos da unidade ou resultados de conjuntos de dados de ICV de provedores de dados;
- Média dos dados de ICV ao longo do processo ou produto, incluindo para produção em desenvolvimento, fornecimento e consumo;
- Modelagem do sistema pela conexão e dimensionamento dos conjuntos de dados corretamente, provando que tal sistema realmente fornece a unidade funcional estudada;
- Resolução de problemas de multifuncionalidade nos processos no sistema;
- Cálculo dos resultados do ICV, isto é, realização da somatória de todas as entradas e saídas para todos os processos dentro das fronteiras do sistema. Se totalmente modelado, apenas os fluxos de referência e fluxos elementares deverão permanecer no inventário.

1.2.1. Identificação de Processos Dentro das Fronteiras do Sistema

A fronteira do sistema do produto, em um estudo de ACV, inclui ainda, por exemplo, processos de mineração, processamento, manufatura, uso, reparos e manutenção, assim como transporte, tratamento de resíduos e outros serviços adquiridos, como os serviços legais e de limpeza, marketing, produção e desativação de bens de capital, operação das instalações, tais como varejo, armazenamento, escritórios de administração, deslocamentos de pessoal, viagens de negócios, etc. Resumindo, todas as atividades não acidentais que são realizadas de forma relacionada ao sistema analisado e que podem também ser atribuídas a ele (modelagem atribucional) ou esperadas/modeladas como uma consequência de uma decisão do sistema de primeiro plano (modelagem consequencial) devem ser incluídas nas fronteiras do sistema, a menos que sejam quantitativamente irrelevantes pela determinação dos critérios de corte aplicados.

A maneira como processos são identificados com as fronteiras do sistema diferem consideravelmente entre as modelagens atribucional e consequencial, pois diferentes processos e dados são requeridos com base na abordagem de modelagem.

1.2.1.1. Identificação de Processos na Modelagem Atribucional

A modelagem atribucional retrata o sistema da forma como ele pode ser observado/mensurado, ligando processos únicos dentro da tecnosfera ao longo dos fluxos de matéria, energia e serviços. Essa fase de "atribuição" é crucial, mas está apenas implicitamente abordada nas NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas na prática, resultando em fronteiras de sistema, modelos e resultados finais inconsistentes.

Observando a identificação em uma perspectiva mais funcional/técnica, as seguintes fases e processos devem ser, em princípio, atribuídos ao sistema ou processo analisado, começando pela unidade funcional e fluxo de referência do sistema:

- Processo ou sistema central analisado: processo do sistema de primeiro plano que fornece diretamente a unidade funcional ou fluxo de referência analisado como sua função (alguns desses processos são bens, enquanto outros são serviços ou sistemas produto-serviço);
- Incorporação física do bem: bens que fisicamente (de forma parcial ou completa) terminam no bem analisado ou em outros bens que são parte do sistema;
- Contato com o processo central ou bem analisado: bens e serviços que apenas tocam o bem ou processo central, executando uma função de apoio que suporta a prestação da função analisada;
- Serviços para o processo ou sistema central: processos que nem mesmo tocam o processo/bem analisado ou exercem uma função direta para a prestação de um serviço, mas que são requeridos, no entanto, para trabalhar em segundo plano em relação ao processo. Além disso, chegamos a processos marginais que, na verdade, não se relacionam diretamente com o processo ou sistema central. Esses processos indiretos são identificados e se conectam ao sistema de primeiro plano. É importante notar que isso não resulta numa lista interminável de

processos a serem incluídos, pois pela aplicação de regras de corte – com base na experiência em processos semelhantes e julgamento de especialistas – a maioria das etapas pode ser excluída.

Especialmente para processos do sistema de primeiro plano, uma descrição inicial é requerida. Isso irá ser revisado no momento da coleta e documentação dos dados do processo da unidade

1.2.1.2. Identificação de Processos na Modelagem Consequencial

A modelagem consequencial de ICV busca a identificação das consequências de uma decisão no sistema de primeiro plano em outros processos e sistemas da economia e constrói um sistema a ser analisado em torno de tais consequências. Essas consequências são aqueles processos que assumimos serem operados como uma reação à decisão em questão.

Para identificar as consequências detalhadas e processos marginais, além da *expertise* em ACV, as seguintes *expertises* são necessárias, dependendo dos mecanismos e modelos considerados na modelagem consequencial:

- Experiência de previsão de desenvolvimento de tecnologia (curvas de aprendizagem, curvas de experiência);
- Desenvolvimento de cenários;
- Custo e previsões de mercado;
- Modelagem de custos de tecnologia;
- Modelagem de equilíbrio geral;
- Modelagem de equilíbrio parcial.

Os seguintes itens explicam os passos apropriados à modelagem de consequências para o modelo consequencial:

- O primeiro passo no sentido de identificar os processos marginais que fornecem a função e os processos suplantados é identificar/decidir quais as consequências primárias e secundárias e as restrições que devem ser integradas ao modelo;
- Em seguida, está a identificação dos processos que são operados ou deslocadas devido às consequências identificadas;

- Por último, realiza-se a análise das consequências consideradas e, tendo em conta as limitações selecionadas, a identificação dos processos e modelagem do ciclo de vida consequencial. Isso começa a partir da decisão analisada no sistema de primeiro plano.

Devem ser avaliadas a necessidade da inclusão das seguintes consequências a menos que elas já sejam explicitamente requeridas ou diretamente derivadas de um objetivo específico do estudo):

- Processos que sejam operados como consequência direta de mercado da decisão para alcançar a demanda adicional de um produto;
- Processos que suplantem/complementem cofunções de processos multifuncionais que estejam dentro da fronteira do sistema (em casos de resolução de multifuncionalidade por substituição).

As seguintes consequências são secundárias, mas podem ser avaliadas para serem incluídas na análise:

- Aumento na demanda geral por uma cofunção não requerida se seu valor de mercado é reduzido devido à sua disponibilidade adicional em consequência secundária de uma demanda adicional pela função analisada;
- Efeito de incentivo ao processo para aumentar sua eficiência como consequência secundária de um preço maior para sua cofunção determinante em consequência de aumento de demanda;
- Diminuição da demanda por funções concorrentes de uma função não requerida como consequência secundária da diminuição de preço desta devido ao aumento de demanda para a cofunção analisada e, portanto, uma disponibilidade adicional de sua cofunção não requerida;
- Mudanças de comportamento do consumidor.
- Principais passos para identificação de processos no modelo consequencial:
- Considerar as consequências primárias e a dimensão de seu efeito;
- Considerar consequências e limitações secundárias;
- Situação de mercado e competitividade;

- Identificação da mistura de processos/sistemas marginais de longo e curto prazo.

A multifuncionalidade na modelagem consequencial é resolvida de maneira semelhante à modelagem atribucional em um procedimento de dois passos relacionados à subdivisão, incluindo a consideração de: a) causalidade física, em casos de produção combinada real; (b) produção conjunta, substituição em casos gerais de multifuncionalidade ou substituição em modelos de fim de vida ou tratamento de resíduos.

Especialmente para processos do sistema de primeiro plano, uma descrição inicial é requerida e será revisada no momento da coleta e documentação dos dados do processo da unidade.

1.2.2. Planejamento da Coleta de Dados

Antes que o planejamento real da coleta dos dados e informações possa ser realizado, é recomendado obter clareza em algumas opções e considerações, a saber:

- Para o sistema de primeiro plano serão coletados dados específicos, médios ou genéricos?
- Necessidade de dados médios multianuais ou dados genéricos;
- Definição das fontes de dados primárias e secundárias;
- Principal foco para concentração de esforços de coleta.

É importante identificar para quais processos do sistema analisado terão de ser desenvolvidos novos estudos específicos do processo da unidade com dados primários e secundários de produtores ou operadores. Esse é tipicamente o caso empregado para o sistema de primeiro plano completo. O uso de processos técnicos ou diagramas de fluxos é recomendado.

O próximo passo é identificar para quais partes do sistema analisado o uso de conjuntos de dados de ICV médios ou genéricos é mais apropriado. É importante notar que, para um determinado caso, dados médios ou genéricos podem ser mais acurados, completos e precisos, também para alguns processos do sistema de primeiro plano. Se tais dados forem usados, isso precisa ser justificado.

É recomendado identificar sistematicamente fontes de dados e informações necessários. Isso inclui considerar trabalhar para o sistema de fundo, principalmente com resultados de ICV ou com conjuntos de dados de unidade de processo, os quais têm vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas para o caso em questão. Combinações são possíveis se os dados forem consistentes. Dentre as fontes de dados de ICV, as fontes primárias e secundárias podem ser diferenciadas. O princípio orientador deve ser a disponibilidade e a qualidade dos dados mais apropriados. Trabalhar com conjuntos bem documentados e dados já revisados é recomendado, pois isso apoia um uso correto dos conjuntos de dados, uma documentação marginal do sistema analisado e sua revisão.

Um passo importante é avaliar, ao longo do objetivo do estudo, em que pontos dados médios multianuais e genéricos podem ser preferíveis a dados médios anuais, por representarem melhor o processo/sistema. Isso se aplica para processos com fortes variações interanuais no intuito de assegurar uma representatividade temporal suficiente.

Recomenda-se orientar o esforço de coleta de dados pela relevância dos respectivos dados e informações, e basear-se na experiência existente, que reflete o processo ou sistema suficientemente analisado.

1.2.3. Coleta de Dados de ICV da Unidade de Processo

Para todos os processos identificados, os dados de inventário devem ser coletados. Uma coleta real de dados de inventário é tipicamente requerida apenas para o sistema de primeiro plano, enquanto todos os dados para o sistema de segundo plano podem ser buscados em bases de dados disponíveis. Os dados da unidade do processo são a base para todo o trabalho de ICV. Idealmente, eles devem estar relacionados a operações individuais para um processo específico, entretanto, esses dados podem também ser referentes às médias para esses processos ou podem ser genéricos e, portanto, retratar um processo ou tecnologia de forma geral em vez de sua operação específica.

1.2.3.1. Coleta de Dados Básicos para as Unidades de Processos

Recomendações são dadas para a coleta de dados primários básicos e sobre a forma de obtê-los:

- Evitar processos de unidade "caixa preta" (isto é, processos de unidade para os quais os dados coletados são uma combinação de mais de um processo fisicamente separado em passos do processo) por subdivisão ou subdivisão virtual.

- Descrição do que o processo da unidade representa em relação à: (a) tecnologia, geografia e tempo, e qualquer possível limitação de representatividade; (b) Fluxo de referência e unidade funcional.

- Tipos de fluxos de entrada e saída a serem coletados: se possível, dados quantitativos de todas as entradas e saídas relevantes que são associados ao processo da unidade devem ser coletados/modelados. Nos casos em que isso não for possível, as lacunas devem ser documentadas no relatório sobre qualidade de dados e na interpretação dos resultados do estudo. Esses fluxos tipicamente incluem: (a) entradas de produtos consumidos, como fluxos de produtos; (b) Entrada de resíduos, como fluxos de resíduos; (c) Entrada de recursos naturais, como fluxos elementares; (d) Emissões para o ar, água e solo, como fluxos elementares; (e) Outras entradas e saídas que intervêm na ecosfera, como fluxos elementares; (f) Saída de resíduos, como fluxos de resíduos; (g) Saída de bens e serviços de valor agregado fornecidos pelo processo, como fluxos de produtos.

- Os tipos de dados primários: (a) Dados medidos coletados por operadores do processo devem ser preferíveis se possível e apropriado (não apenas dados fisicamente medidos, mas também provenientes de listas de consumo, contas, etc.); (b) Composição e conteúdo energético de produtos e fluxos de resíduos; (c) Vários outros dados podem ser úteis ou até mesmo necessários, como formulações, listas de peças, patentes, engenharia do processo, modelos estequiométricos, especificações e relatórios de testes de produtos e processos, etc.; (d) para modelagem do estágio de uso dos produtos e gerenciamento inicial de resíduos, é recomendado o uso de levantamentos e estudos que analisem o comportamento médio ou típico para complementar as especificações do produto.

- Quantidades do fluxo de referência: é recomendado o uso da quantidade de "uma unidade de referência" do fluxo de referência e expressar o inventário do processo em relação a essa quantidade.

- Representatividade das condições de operação: Os dados de inventário coletados para um processo específico devem, tanto quanto possível e necessário para alcançar o objetivo do estudo, representar o ciclo operacional completo do processo, incluindo todos os estágios quantitativamente relevantes. Isso se aplica também a serviços, e tal representatividade deve ser documentada. Para medições no processo operado, dados de pelo menos um ano completo devem ser usados para se obter dados médios representativos. Para processos parametrizados, as relações matemáticas devem representar mudanças relevantes do inventário em relação a parâmetros de influência, incluindo relações quantitativas e qualitativas entre fluxos de inventário.

- Verificação de limites legais: É recomendada a verificação da existência de limites legais relevantes para orientação de quais fluxos que devem ser incluídos em quaisquer casos.

- O dimensionamento correto da unidade funcional e do fluxo de referência deve ser assegurado ao converter os dados primários para os fluxos de inventário. Recomenda-se documentar todos os passos efetuados no tratamento dos dados brutos para os fluxos do inventário do processo de unidade.

- Resolução de questões de confidencialidade: Informações confidenciais ou particulares podem ser protegidas pela agregação dos resultados de ICV e conjuntos de dados do sistema. A transparência pode ser assegurada pela documentação de informações confidenciais em um "relatório confidencial" à parte, acessível apenas para os revisores críticos.

- Uma verificação da validade dos dados coletados deverá ser realizada durante o processo de coleta de dados. Para tal controle de qualidade interino sobre o processo de unidade, recomenda-se aplicar os aspectos técnicos de qualidade dos dados da revisão crítica sobre o alcance e os métodos de revisão.

- Lacunas relevantes de dados de inventário podem ser preenchidas, se possível, por: (a) Identificação da relevância de dados inicialmente faltantes; (b) Se essa triagem mostra que a falta de dados pode ser de importância nas iterações futuras do trabalho de ACV, deve tentar-se,

primeiro, identificar se o fluxo está realmente acontecendo no processo analisado e então se obter os dados ainda em falta; como segunda opção, estimativas devem ser obtidas; ou, como terceira opção, a lacuna deve ser mantida e comunicada; (c) Para cada novo processo de unidade modelado, quaisquer dados inicialmente faltantes devem ser documentados de forma transparente e consistente; já para julgar a relevância de uma lacuna de dados inicial, é necessário aproximar a exatidão, a precisão e a completeza alcançadas do impacto ambiental total no nível do sistema; as lacunas de dados devem, geralmente, ser preenchidas com dados metodologicamente consistentes, e apenas dados que aumentem a qualidade geral do inventário final para o sistema analisado devem ser usados; (d) Se dados estimados que preencham tais requisitos não estiverem disponíveis, a lacuna de dados deverá ser mantida e documentada.

Recursos não renováveis de energia devem ser inventariados como tipo de recurso energético e em poucos casos (apenas de petróleo primário, secundário, terciário a céu aberto ou de mineração subterrânea de carvão) devem ser diferenciados exclusivamente por tipo de extração de recursos, se essa informação estiver disponível. A relação energia/massa deve ser fornecida para todos os fluxos de recursos energéticos, à exceção de minérios nucleares.

Fontes de energia renováveis devem ser inventariadas como a quantidade de energia utilizável extraída da natureza. Para a biomassa da natureza, esta é a quantidade fisicamente incorporada, medida como valor calorífico inferior de substâncias sem água.

Recursos não devem ser inventariados de forma geograficamente diferenciada e recursos para produção de metais ou outros elementos químicos devem ser inventariados como elementos químicos.

Uso direto e a transformação do solo devem ser inventariados ao longo das necessidades do método de AICV aplicado e se o uso ou transformação do solo forem modelados, dióxido de carbono e outras emissões e efeitos relacionados também devem ser modelados.

A respeito do uso de água, é recomendado que, pelo menos as entradas (água doce de superfície, águas subterrâneas renováveis, a água subterrânea fóssil/profunda, a água do mar), saídas (emissão / descarga de água em forma líquida, emissões em forma de vapor) e mudanças na qualidade de água,

especialmente por substâncias químicas, sejam inventariadas como fluxos elementares separados.

Todas as emissões e outros fluxos elementares que ocorrem além dos próximos 100 anos da data do estudo de ACV devem ser inventariados separadamente daqueles que ocorrem dentro dos próximos 100 anos.

Tratamentos de resíduos e águas residuais devem ser modelados consistentemente com as fronteiras entre a tecnosfera e a ecosfera; caso contrário, isso deve ser claramente documentado e explicitamente considerado na interpretação subsequente.

Duas exceções são resíduos radioativos e resíduos em depósitos subterrâneos, os quais devem ser mantidos como fluxos de resíduos específicos no inventário, a menos que o gerenciamento detalhado a longo prazo e intervenções relacionadas tenham sido completamente modeladas também para esses casos.

1.2.3.2. Seleção de Conjuntos de Dados Secundários de ICV

Os dados secundários (genéricos, médios ou específicos), para serem usados no modelo do sistema, devem ser metodologicamente consistentes com conjuntos de dados primários que foram especificamente coletados. Conjuntos de dados secundários devem ser selecionados de acordo com sua qualidade de dados em um sentido mais estrito, ou seja, sua representatividade tecnológica, geográfica e temporal, completeza e precisão. Seus fluxos de referência e/ou unidade funcional devem, além disso, ser suficientemente representativos para o processo, bem ou serviço específico que tais dados objetivam representar no sistema analisado.

É recomendado dar preferência a conjuntos de dados com revisão crítica prévia, uma vez que eles limitam o esforço de revisão do sistema analisado. É também indicado dar preferência a conjuntos de dados que estão apoiados por documentação completa e eficientemente organizada.

1.2.4. Modelagem do Sistema

Os inventários de todos os processos dentro das fronteiras do sistema devem ser corretamente dimensionados em relação aos demais e à unidade funcional e fluxo de referência do sistema analisado. Nenhum fluxo de produto ou resíduo quantitativamente relevante pode ser deixado sem modelagem

ou desconectado, com exceção dos fluxos de referência que representem quantitativamente a unidade funcional do sistema. Caso contrário, esses fluxos deverão ser claramente documentados e a lacuna de precisão e completeza resultante deverá ser considerada na interpretação dos resultados.

É recomendado verificar previamente, durante a modelagem, se os conjuntos de dados ou sistema estão propriamente modelados e se atendem aos requisitos de qualidade identificados na fase de escopo.

Lacunas de dados devem ser preenchidas com conjuntos de dados metodologicamente consistentes, enquanto lacunas com pouca relevância podem também ser preenchidas com conjuntos de dados desenvolvidos pelas orientações do ILCD Handbook (EC-JRC, 2010a) que atendam os requisitos gerais de qualidade.

1.2.5. Cálculo dos Resultados do ICV

Dependendo do nível de agregação requerido para as aplicações previstas, os inventários de todos os processos inclusos devem ser dimensionados de acordo com sua participação no sistema geral do produto e agregados em, por exemplo, estágios do ciclo de vida ou do sistema do produto completo.

Os mesmos procedimentos de cálculo devem ser aplicados consistentemente no sistema analisado, no momento da agregação dos processos dentro das fronteiras do sistema, para obtenção dos resultados do ICV. É necessário: (a) determinar, para cada processo dentro da fronteira do sistema, quanto de seu fluxo é requerido para o sistema emitir sua unidade funcional e/ou fluxo de referência; (b) dimensionar o inventário de acordo com cada processo; (c) somar os inventários corretamente dimensionados de todos os processos dentro da fronteira do sistema; (d) Se a aplicação pretendida dos resultados requer uma avaliação de impacto de localidade não genérica, a agregação dos fluxos elementares relacionados à localidade deve ser evitada no cálculo dos resultados; (e) Se dados desagregados não puderem ser publicamente apresentados, é recomendado prever a realização da avaliação de impacto no nível desagregado, fornecendo os resultados de AICV juntamente com os resultados agregados de ICV.

Quaisquer fluxos de produtos e resíduos que permaneçam no inventário e que sejam fluxos não funcionais devem ser salientados no relatório e/ou conjunto de dados. Eles também precisam ser modelados mais tarde para o

uso do conjunto de dados, ou então esta lacuna precisa ser explicitamente considerada na interpretação e conclusão subsequentes do estudo.

1.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

O objetivo da AICV, segundo ABNT (2008), é avaliar o sistema de produto sob uma perspectiva ambiental com o uso de categorias de impacto e de indicadores de categoria associados aos resultados do ICV. Para Udo de Haes et al. (2002), essa fase avalia a significância das intervenções ambientais contidas no inventário do ciclo de vida. A AICV agrega os dados obtidos nos inventários de forma a facilitar sua interpretação.

Segundo a NBR ISO 14044 (2009b), as etapas obrigatórias da avaliação de impacto do ciclo de vida são:

- Seleção das categorias de impactos;
- Classificação dos aspectos nos impactos, de acordo com sua importância;
- Caracterização pela valoração do aspecto, de acordo com sua magnitude em relação ao impacto.

Adicionalmente, há os elementos opcionais para a normatização, o agrupamento e a ponderação dos resultados dos indicadores e técnicas de análise da qualidade dos dados. O nível de detalhes, a escolha dos impactos avaliados e os métodos dependem do objetivo e do escopo do estudo.

A seleção das categorias de impacto deve ser completa, abrangendo todas as questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema analisado. Dependendo da aplicação pretendida, pode ser decidido durante a definição de objetivo trabalhar com uma seleção limitada de categorias de impacto ambiental. A exclusão inicial de categorias de impacto relevantes deve ser claramente documentada e considerada na interpretação dos resultados, pois pode limitar consideravelmente as conclusões e recomendações do estudo.

Existem métodos de AICV para "pontos intermediários" (*midpoint*) e "pontos finais" (*endpoint*), ou ambos, em metodologias integradas de AICV. De forma geral, em metodologias *midpoint,* um número maior de categorias de impacto é determinado, e os resultados são mais exatos e precisos comparados com as avaliações de *endpoint*, as quais consideram normalmente as três áreas de proteção (saúde humana, qualidade do ecossistema e uso de recursos).

As principais categorias consideradas em uma avaliação de *midpoint* são: mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, toxicidade humana, inorgânicos respiratórios, radiação ionizante, formação fotoquímica de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, uso do solo e esgotamento de recursos.

Dependendo do objetivo do estudo e da natureza do sistema estudado, a inclusão de categorias ou fatores de impacto faltantes, que sejam relevantes para os resultados finais, pode ser necessária. Além disso, para estudos comparativos de ACV, também é importante que a adequação de metodologias genéricas de AICV seja discutida na fase de interpretação do estudo.

A normalização, agrupamento e ponderação são estágios opcionais que buscam um resultado completamente agregado.

Na normalização, os resultados dos indicadores para as diferentes categorias de impacto de danos *midpoint* ou *endpoint* são expressos em relação a uma referência comum, pela divisão dos resultados do indicador pelo respectivo valor de referência.

Os valores de referência normalmente utilizados são os resultados do impacto total anual territorial de fluxos elementares em um país, região ou continente, ou de forma global, *per capita*, por exemplo. Para resultados *midpoint* a base da normalização é o impacto potencial total, calculado a partir de um inventário anual dos fluxos elementares. Para resultados *endpoint*, a base da normalização é o dano total causado nas áreas de proteção (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos naturais).

Na ponderação, os resultados dos indicadores para diferentes categorias de impacto ou danos são multiplicados (cada um deles) por um fator de ponderação específico, que tem a intenção de refletir a relevância de diferentes categorias/fatores de impactos dentre as outras.

Conjuntos de ponderação podem ser desenvolvidos por diferentes mecanismos, por formuladores de políticas públicas ou painéis de indústrias, de partes interessadas, de peritos, etc. É importante notar que fatores de ponderação são sempre subjetivos e refletem valores pressupostos. Portanto, após a ponderação, é importante, na interpretação do estudo, deixar claros tais pressupostos e limitações, para que a avaliação dos resultados obtidos seja direcionada e não enganosa.

As normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) indicam a estrutura metodológica geral das fases para a realização da ACV, assim como da AICV. Contudo, não indicam os métodos para a realização do estudo.

1.3.1. Metodologias de AICV

Existem hoje mais de 50 métodos de AICV disponíveis na Europa (EPLCA, 2010), conforme apresentado na Tabela 1. São técnicas específicas referentes aos impactos ambientais que integram o escopo das avaliações efetuadas em diferentes regiões. No entanto, verifica-se a existência de esforços no sentido de ampliar o escopo de aplicação desse instrumento, levando em consideração as diferenças espaciais regionais dos demais ambientes mundiais.

Tabela 1. Países de origem das principais metodologias de AICV.

Metodologia	Desenvolvida por	País de origem
CML	CML	Holanda
Eco-Indicator 99	PRé	Holanda
EDIP97 – EDIP2003	DTU	Dinamarca
EPS 2000	IVL	Suécia
Impact 2002+	EPFL	Suíça
LIME	AIST	Japão
LUCAS	CIRAIG	Canadá
ReCiPe	RUN + Pré + CML + RIVM	Holanda
Swiss Ecoscarcity 07	E2+SEU-services	Suíça
TRACI	US EPA	Estados Unidos
MEEuP	VhK	Holanda
Impact World +	DTU, CIRAIG, EPFL	Cooperação global

Fonte: EC-JRC (2010b).

Os principais métodos amplamente utilizados na fase de avaliação de impactos da ACV são: *Eco Indicator 99, EDIP 97, EDIP 2003, (Dutch) Handbook on LCA (CML2002), TRACI, EPS 2000, Impact 2002(+), LIME, Swiss Ecoscarcity (Ecopoints 2006), ReCiPe, MEEuP* e *Impact World +*. Esses métodos são majoritariamente desenvolvidos dentro do escopo regional europeu, no entanto, verifica-se a existência de esforços no sentido de ampliar o escopo de aplicação desse instrumento, considerando as diferenças espaciais regionais dos demais ambientes mundiais.

Nesta etapa, passaremos então a uma descrição sintética de algumas dessas principais metodologias de AICV (as mais utilizadas em estudos envolvendo sistemas construtivos), tomando como base sua estruturação geral, contexto, e, principalmente, suas particularidades, de forma que se possa, assim, estabelecer mais claramente as diferenças e similaridades entre elas.

1.3.1.1. CML 2002 (GUINÉE et al., 2002)

Metodologia holandesa de avaliação *midpoint*, a CML busca as melhores práticas para os indicadores de operacionalização *midpoint* da série de normas ISO 14040. Sua validade regional é global, exceto no que se refere à acidificação e formação de foto-oxidantes (para os quais a abrangência é apenas para a Europa).

Para todas as categorias de emissão, princípios semelhantes são utilizados com respeito, por exemplo, à manipulação de tempo, espaço e não linearidades. Para cada indicador, fatores de normalização específicos são calculados.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) são:

- Fundamentação científica de apoio a todas as escolhas importantes;
- Fornecimento de fatores alternativos de AICV para análises de sensibilidade em cada categoria de impacto;
- Distinção entre categorias de impacto básicas, específicas do estudo e outras;
- A maioria de suas categorias de impacto já foi descrita em artigos científicos;
- Princípios para AICV desenvolvidos juntamente com os princípios para os outros elementos da metodologia de ACV.

1.3.1.2. Eco-indicator 99 (GOEDKOOP; SPRIENSMA, 2000)

Eco-indicador 99 é uma metodologia *endpoint* desenvolvida com o objetivo de simplificar a interpretação e ponderação dos resultados. Uma das aplicações previstas é o cálculo de pontuações de eco-indicadores de um único ponto que

podem ser usados por projetistas no dia-a-dia para tomada de decisão, mas também como um método de avaliação de impacto geral na ACV.

Possui categorias de impacto globais para mudanças climáticas, destruição do ozônio e recursos. Para outras categorias de impacto, todas as emissões são assumidas a ter lugar na Europa.

Todos os mecanismos ambientais são marginais. O uso de apenas três indicadores por categoria de impacto também força a harmonização em modelos.

A normalização não é feita por categoria de impacto, mas por área de proteção (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos naturais).

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b), são:

- O uso de três perspectivas para criar conjuntos consistentes de escolhas subjetivas a respeito da perspectiva temporal aplicada, a importância da capacidade de gerenciamento, o papel do desenvolvimento tecnológico futuro e do nível de mecanismos de causa-efeito;
- O uso consistente, em uma abordagem totalmente integrada, da mesma unidade de resultado para todas as categorias de impacto, resultando em danos para a saúde humana, ecossistemas ou recursos, respectivamente;
- Evita a dupla contagem da categoria de uso do solo com ecotoxicidade e eutrofização;
- A fase de normalização é baseada em indicadores *endpoint*.

1.3.1.3. EDIP 1997-2003 (WENZEL et al., 1997; POTTING; HAUSCHILD, 2005)

A parte de AICV de EDIP97 (WENZEL et al., 1997) é composta por categorias clássicas relacionadas com categorias de impacto de emissões *midpoint*, bem como recursos e ambiente de trabalho. Inclui normalização e ponderação dos impactos ambientais com base em metas de políticas ambientais. EDIP2003 (POTTING; HAUSCHILD, 2005) é uma continuação da metodologia com a inclusão da avaliação de exposição com base em informações regionais de AICV relacionado com categorias de impacto de emissões não globais *midpoint*. As principais particularidades dessa metodologia são (EC-JRC, 2010b):

- O aquecimento global tem fatores de caracterização para todos os compostos orgânicos voláteis de origem petroquímica;
- Fatores de caracterização de destruição do ozônio têm horizontes de tempo mais curtos (5 e 20 anos) de potencial relevância, uma vez que o principal problema com a destruição do ozônio estratosférico será nas próximas décadas;
- Ambiente de trabalho diferenciado;
- Revisão externa por pares de todos os modelos de caracterização.

1.3.1.4. IMPACT 2000+ (JOLLIET et al., 2003)

Esta metodologia propõe uma implementação viável de abordagem combinada *midpoint/endpoint*, ligando todos os tipos de resultados de ICV (fluxos elementares e outras intervenções) com 14 categorias *midpoint* e quatro *endpoint*. Traz novos conceitos e métodos, com base em abordagens existentes, para garantir que melhor se ajustem ao escopo comparativo de AICV, especialmente para a avaliação comparativa de toxicidade humana e eco-toxicidade. Foi desenvolvido em colaboração com os desenvolvedores do método LIME e outras categorias *midpoint* a partir da adaptação de métodos existentes (Eco-indicador 99 e CML, 2002). Todos os impactos *midpoint* são expressos em unidades de uma substância de referência e relacionados com as quatro categorias de impacto: saúde humana, qualidade do ecossistema, alterações climáticas e recursos. A normalização pode ser realizada no nível *midpoint* ou *endpoint*.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b), são:

- Novos conceitos e métodos de avaliação comparativa melhorada de toxicidade humana e efeitos de ecotoxicidade (ambos são baseados em respostas médias em vez de suposições conservadoras) foram desenvolvidos para IMPACT 2002 +;
- Para categorias recursos, o conceito de energia é excedente, de acordo com Muller Wenk (1994); mas, para os combustíveis fósseis, é a soma da energia primária e excedente.Desenvolvimentos têm sido realizados sobre a exposição do ar interior e impactos diretos de pesticidas.

1.3.1.5. ReCiPe (GOEDKOOP et al., 2008)

O método ReCiPe é uma continuação dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2002. Ele integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura consistente. Embora inicialmente a integração dos métodos fosse o objetivo, todas as categorias de impacto têm sido remodeladas e atualizadas (exceto radiação ionizante). O método não foi publicado como um único documento ainda, mas categorias de maior impacto têm sido descritas em periódicos científicos. Para todas as categorias de emissões, princípios e escolhas semelhantes são usados. Todos os impactos são marginais. Todas as categorias de impacto da mesma área de proteção têm a mesma unidade de indicador. Os mesmos mecanismos ambientais são usados para cálculos de *midpoint* e *endpoint.*

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b), são:

- Uso consistente de *midpoints* e *endpoints* no mesmo mecanismo ambiental. Pontos médios são escolhidos o mais próximo possível aos resultados de ICV (menor incerteza do indicador);
- Abordagem marginal consistente;
- Subcompartimentos de ar rural e urbano aplicados a fatalidades e modelo de exposição para a toxicidade humana.
- A maioria das categorias de impacto já foi descrita em artigos científicos.

1.3.1.6. Ecological Scarcity Method / Ecopoints 2006 (MULLER-WENK, 1994)

O método de *Ecological Scarcity* – às vezes chamado *Swiss Ecoscarcity* ou *Swiss Ecopoints* – permite uma ponderação comparativa e agregação de várias intervenções ambientais pelo uso dos chamados eco-fatores.

O método fornece esses fatores de ponderação para emissões diferentes em água, ar e solo superficial ou águas subterrâneas, bem como para o uso dos recursos energéticos. Os fatores ecológicos baseiam-se nos fluxos anuais reais (fluxos atuais) e no fluxo anual, considerado como crítico (fluxos críticos), em uma área definida (país ou região). Os eco-fatores foram originalmente desenvolvidos para a área da Suíça e, mais tarde, conjuntos de eco-fatores

também foram disponibilizados para outros países, como Bélgica e Japão. O método foi desenvolvido para avaliações ambientais padrão, por exemplo, de produtos ou processos específicos.

1.3.1.7. TRACI (BARE et al., 2003)

Foi desenvolvido pela EPA dos EUA como um método *midpoint* que representa as condições ambientais nos EUA como um todo ou por estado. Durante o desenvolvimento do TRACI, a coerência com os pressupostos de modelagem anteriores foi importante para cada categoria de impacto. Para categorias como a acidificação e formação de fumaça, modelos empíricos detalhados norte-americanos, como os desenvolvidos pelo *United States National Acid Precipitation Assessment Program* e *California Air Resources Board*, permitiram a inclusão das abordagens mais sofisticadas para localizações específicas e fatores de caracterização para localização específica. Escolhas são minimizadas pela utilização de níveis *midpoint*. Nos quais as escolhas necessárias são feitas com base nas políticas da EPA.

As principais particularidades dessa metodologia, segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b), são:

- Esse método é apoiado pela EPA dos EUA e é especialmente relevante para as emissões que ocorrem como parte de ciclos de vida do produto nos EUA.
- Para a acidificação, eutrofização e formação de fumaça, fatores de caracterização regionais específicos (por estado) estão disponíveis.

1.3.1.8. Impact World + (IMPACT WORLD +, 2012)

A maioria dos impactos modelados na ACV é regional ou local, no entanto, as metodologias de ACV atualmente oferecem fatores de caracterização genéricos, os quais representam condições médias para uma região específica, como um país ou continente, sem levar em consideração a variabilidade espacial desses impactos.

A metodologia IMPACT World+ está sendo desenvolvida como resposta à necessidade de regionalização da avaliação de impacto. Essa metodologia cobre todo o mundo, implementando abordagens de modelagem de caracterização

desenvolvidas como uma atualização conjunta dos métodos IMPACT 2002+, EDIP e LUCAS.

Informações relacionadas à variabilidade espacial e modelagem de incertezas estão inclusas, e a metodologia oferece fatores de caracterização para cada continente, permitindo a avaliação regional de qualquer emissão/consumo de recursos que seja georreferenciado, como fornecido pelo banco de dados Ecoinvent, e a determinação da incerteza relativa a uma emissão de localização desconhecida, associando a variabilidade geográfica correspondente de cada fator de caracterização em uma determinada escala geográfica. A Figura 10 mostra a estrutura do método Impact World+.

1.4. Interpretação de Ciclo de Vida

A fase de interpretação de uma ACV tem dois objetivos principais que se diferenciam fundamentalmente:

- Durante os passos iterativos da ACV e para todos os tipos de entregas, a fase de interpretação serve para orientar o trabalho no sentido de melhorar os modelos de ICV para atender as necessidades derivadas do objetivo do estudo.

- Se as etapas iterativas da ACV resultaram no modelo e resultados finais de ICV e, especialmente, para estudos comparativos de ACV, a fase de interpretação serve para tirar conclusões robustas e – muitas vezes – recomendações.

A interpretação de ciclo de vida é a fase da ACV em que os resultados das demais etapas são então considerados coletivamente e analisados sob a luz do rigor, completeza e precisão alcançados para os dados utilizados, assim como também para as suposições que tenham sido assumidas durante o estudo de ACV/ICV. Os resultados finais da interpretação podem ser conclusões e recomendações, as quais devem respeitar as intenções e restrições do objetivo e escopo definidos para o estudo. Isso está especialmente relacionado com a adequação da unidade funcional e fronteiras do sistema, assim como a qualidade dos dados obtidos em relação ao objetivo. A interpretação deve apresentar os resultados da ACV de forma inteligível e ajudar o usuário do estudo a avaliar a robustez das conclusões e compreender as limitações potenciais do estudo.

A fase de interpretação é composta de três etapas:

- Identificação das questões significativas, como processos elementares, parâmetros, suposições e fluxos elementares;
- Tais questões devem ser avaliadas considerando sua sensibilidade ou influência nos resultados gerais do estudo de ACV, etapa que inclui avaliações de completeza e consistência;
- Os resultados da avaliação devem ser usados na formulação de conclusões e recomendações a partir do estudo de ACV.

Em casos em que o estudo envolve comparações entre dois ou mais sistemas, considerações adicionais deverão ser incluídas na interpretação.

1.4.1. Identificação de Questões Significativas

O objetivo desse primeiro elemento da interpretação é analisar e estruturar os resultados das fases anteriores da ACV de forma a identificar as questões significativas. Há dois aspectos inter-relacionados das questões significativas:

- Primeiramente, há os principais contribuintes para os resultados da AICV, isto é, os estágios, processos e fluxos elementares mais relevantes do ciclo de vida, assim como as categorias de impacto mais relevantes;
- Em segundo lugar, há as principais escolhas que podem ter influência potencial na precisão dos resultados finais da ACV, como escolhas metodológicas, suposições, dados utilizados para determinar os inventários dos processos, metodologias utilizadas para a AICV, assim como fatores de normalização e ponderação opcionalmente utilizados.

1.4.2. Análise de Contribuição

A análise de contribuição pode ser requerida para várias aplicações:

- Identificar a necessidade de coleta de novos dados ou de melhoria de qualidade de dados por meio da quantificação da completeza do inventário;
- Concentrar mais esforços na coleta de dados sobre os processos que mais contribuíram e intervenções individuais de fluxos elementares;

- Concentrar esforços em *ecodesign* e melhoria/desenvolvimento do produto nos processos que mais contribuíram e em intervenções individuais de fluxos elementares;
- Informar a parcela de contribuição interna e externa para o impacto ambiental global às partes interessadas;
- Contribuir para o controle de qualidade interno durante o trabalho de ACV, investigando a verossimilhança qualitativa e quantitativa dos resultados detalhados da análise de contribuição.

1.4.3. Avaliação

A avaliação é realizada no intuito de estabelecer fundamentos para se obter conclusões e fornecer recomendações durante a interpretação dos resultados de ICV/ACV. Tal avaliação envolve a verificação de completeza, a verificação de sensibilidade e a verificação de consistência.

O resultado da avaliação é crucial para dar robustez às conclusões e recomendações do estudo e precisa ser apresentado de forma que dê uma compreensão clara dos resultados. Usando os mesmos métodos e abordagens como a avaliação final do estudo de ACV, a avaliação é também usada durante o desenvolvimento do estudo para analisar a completeza, o rigor, a precisão e a consistência alcançados. Isso serve para identificar a necessidade de dados adicionais ou melhores, assim como revisão de suposições feitas e outras escolhas metodológicas.

1.4.3.1. Verificação de Completeza

Verificações de completeza no inventário são realizadas de forma a determinar em que grau a lista de dados está completa e se os critérios de corte foram cumpridos. Caso os critérios de corte não tenham sido obedecidos, dados adicionais ou melhores deverão ser usados para satisfazer o objetivo e escopo da ACV.

Durante a execução da verificação de completeza, fatores de AICV e fluxos elementares faltantes devem ser quantitativamente considerados. Em casos nos quais os critérios de corte não puderem ser atingidos, as definições de objetivo e escopo deverão ser ajustadas para acomodar tal lacuna de completeza, o que

pode significar que questões originais do objetivo não poderão ser respondidas ou que os dados obtidos não atingiram a qualidade requerida.

Como regra geral, é recomendada a inclusão do maior número de fluxos elementares possível no inventário para permitir que o usuário realize uma avaliação de impacto detalhada. É importante notar que a porcentagem de completeza alcançada não pode ser mal interpretada, como indicando exatos 100% de completeza. No entanto, a completeza alcançada indica o valor real aproximado.

Na prática, essa questão pode ser razoavelmente abordada da seguinte forma: depois da modelagem do sistema com os dados disponíveis, para todas as lacunas de informação, um valor/fluxo "bem aproximado" deverá ser identificado pelo julgamento de especialistas. Isso se relaciona a todos os tipos de lacunas de informações e dados, especialmente:

- Tipos e quantidades de dados de fluxos inicialmente faltantes;
- Composições de elementos e conteúdo de energia de todos os fluxos que contribuam de forma relevante para a massa total dos fluxos;
- Custos de todos os bens e serviços que contribuam de forma relevante para o custo e valor total de produção;
- Impacto ambiental dos dados faltantes para bens e serviços consumidos.

As mais problemáticas são as lacunas qualitativas, ou seja, a falta de conhecimento da ocorrência de um fluxo. Para emissões, provisões legais de qualquer natureza que visem à apresentação de relatórios, medição ou à redução dessas emissões são um meio adequado para detectar a sua existência e relevância potencial.

Para obtenção dos valores de completeza atingidos, provisórios ou finais, uma porcentagem de cobertura de dados (com qualidade, no mínimo, de dados estimados) é calculada. Esse procedimento utiliza o valor aproximado de 100% do modelo de sistema completo, incluindo dados de baixa qualidade como referência.

1.4.3.2. Verificação de Sensibilidade

A verificação de sensibilidade tem o objetivo de avaliar a confiabilidade dos resultados, conclusões e recomendações do estudo de ACV. Julgamento de

especialistas e experiências anteriores contribuem para a análise de sensibilidade. Análise de cenários e cálculos de incerteza são os métodos quantitativos para apoiá-la. Na fase de interpretação, a análise de sensibilidade é utilizada juntamente com informações sobre as incertezas de questões significativas dentre os dados de inventário, de avaliação de impacto e suposições e escolhas metodológicas para avaliar a confiabilidade dos resultados finais, conclusões e recomendações baseadas em tais resultados.

A análise de sensibilidade deve verificar as limitações na adequação de escolhas de escopo em relação ao objetivo do estudo, assim como o estabelecimento de conclusões e recomendações, especialmente:

- Identificação dos sistemas a serem estudados;
- Identificação das funções e unidades funcionais do sistema ou, em caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- Identificação da modelagem e abordagem de ICV apropriadas a serem aplicadas;
- Identificação das fronteiras do sistema e quantificação do critério de corte;
- Seleção das categorias de impacto e métodos de AICV a serem aplicados;
- Identificação da abordagem a ser usada para interpretação;
- Identificação dos dados de ICV e requisitos de qualidade dos dados, incluindo a aplicabilidade dos dados de inventário nos métodos de AICV selecionados;
- Seleção de métodos de normalização e ponderação, caso sejam inclusos no estudo;
- Tipos de suposições e relevância das escolhas de valores feitas;
- Identificação das limitações aplicáveis ao uso e/ou interpretação dos resultados.

Em relação a questões de objetivo e escopo, a verificação de sensibilidade pode ser feita pelo cálculo e comparação de cenários, especialmente para diferentes abordagens de alocação na fase de inventário. Para outros itens, isso

pode ser feito por análise qualitativa baseada no julgamento de especialistas e apoiada em experiências anteriores.

A análise de sensibilidade deve verificar a existência de limitações na adequação do trabalho de ICV em relação ao objetivo e escopo do estudo, assim como estabelecer conclusões e recomendações. Isso se refere, especialmente, à coleta e seleção adequada de dados de inventário em relação à:

- Representatividade tecnológica, geográfica e temporal para o sistema analisado;
- Completeza do inventário em relação às categorias de impacto escolhidas e quantitativamente relevantes;
- Precisão dos valores e parâmetros de inventário, devido à incerteza dos dados primários utilizados.

A verificação pode ser feita por análise de cenários e/ou ser acompanhada por um cálculo de incerteza.

Em relação à AICV, a verificação de sensibilidade pode ser realizada por uma análise de cenários, aplicando-se diferentes metodologias de AICV possíveis. Isso pode ser acompanhado por um cálculo de incertezas nos resultados da AICV.

Devido ao caráter iterativo da ACV, a análise de sensibilidade pode ainda ser utilizada como um elemento integrado nas iterações do estudo, incorporando a coleta de dados de inventário, a avaliação de impacto e a determinação de fronteiras do sistema. Os resultados das análises de sensibilidade anteriores poderão então ser usados como ponto de partida para a verificação de sensibilidade da interpretação.

1.4.3.3. Verificação de Consistência

A verificação de consistência é realizada para investigar se as suposições, métodos e dados foram aplicados de forma consistente no decorrer do estudo de ACV. Essa verificação é aplicável ao ciclo de vida de um sistema analisado, assim como entre sistemas comparados.

Questões metodológicas de relevância são, especialmente, a modelagem e abordagem de ICV, como também o estabelecimento de fronteiras do sistema, excesso de dados, aplicação consistente da avaliação de impacto e

outras suposições. Na fase de inventário, as principais questões são aquelas relacionadas à consistência da representatividade temporal, geográfica e tecnológica dos dados, à adequação do processo de unidade escolhido ou à capacidade dos resultados do ICV representarem os processos do sistema, assim como a completeza e precisão dos dados. Questões relacionadas à avaliação de impacto são aquelas referentes à aplicação consistente dos elementos da AICV, incluindo os fatores de normalização e ponderação.

1.4.4. Conclusões, Limitações e Recomendações

Integrando o resultado dos outros elementos da fase de interpretação e baseando-se nas principais conclusões das fases anteriores da ACV, os elementos finais da interpretação são o estabelecimento de conclusões, identificação das limitações do estudo e desenvolvimento de recomendações para o público-alvo, de acordo com a definição de objetivo e aplicações previstas dos resultados.

As limitações mais frequentemente notáveis para estabelecimento de conclusões significativas são:

- As fronteiras do sistema/critérios de corte;
- Qualidade e consistência alcançadas para os dados de ICV, conforme o objetivo do estudo;
- Incertezas das metodologias de AICV;
- Suposições da fase de definição de objetivo;
- Outras limitações metodológicas ou específicas do estudo.

Se as conclusões forem consistentes com os requisitos, elas podem ser relatadas como conclusões finais, caso contrário, essas precisarão ser reformuladas e verificadas novamente. Quaisquer limitações do estudo dentro do objetivo e escopo devem ser listadas, e então avaliadas, para cada uma, o tipo e a magnitude das consequências que elas têm para as conclusões e aplicações pretendidas.

Em estudos que envolvem a comparação de sistemas, a interpretação deve considerar alguns pontos adicionais, para assegurar conclusões justas e relevantes a partir do estudo:

- Questões significativas devem ser determinadas para cada um dos sistemas, com atenção especial para questões que venham a diferir entre os sistemas e que tenham potencial de mudar conclusões da comparação. Tais conclusões precisam ser eliminadas se possível ou, caso contrário, consideradas na formulação do relatório;

- Caso uma análise de incerteza foi realizada para investigar se a diferença entre dois sistemas é estatisticamente significativa, tal análise deve ser realizada nas diferenças entre os sistemas, levando em conta variações entre processos;

- A verificação de consistência aborda o tratamento consistente de questões-chave nos diferentes sistemas e é fundamental para assegurar uma comparação justa.

Recomendações baseadas nas conclusões finais do estudo de ACV devem ser lógicas, razoáveis e plausíveis, além de estritamente relacionadas com as aplicações pretendidas, conforme definido no objetivo do estudo.

1.4.5. Comunicação

A forma e níveis de apresentação de relatórios dependem de três fatores primários:

- Os tipos de entregas do estudo;

- O objetivo e aplicações pretendidas do estudo e do relatório;

- O público-alvo (especialmente audiência técnica ou não técnica e interna ou de terceira parte/pública).

Independentemente se os resultados da AICV sejam publicados em forma de relatório ou conjunto de dados, por razões de transparência, eles devem ser acompanhados pelos resultados do ICV. Existem três tipos de relatórios:

- Relatório para uso interno e que não deverá ser divulgado a nenhuma parte externa à instituição que encomendou/financiou o estudo ou que realizou o trabalho de ACV;

- Relatório para documentar e/ou comunicar os resultados da ACV no intuito ser apresentados a uma terceira parte;

- Estudo que envolve uma comparação de produtos cujos resultados deverão ser divulgados ao público.
- O relatório de um estudo de ACV deve ser composto pelos seguintes elementos:
- Sumário Executivo (para audiência não técnica): deve incluir, pelo menos, elementos-chave do objetivo e o escopo do sistema estudado. Os principais resultados das fases de ICV e AICV devem ser apresentados de maneira a assegurar o uso apropriado da informação, assim como afirmações relevantes sobre qualidade dos dados, suposições e julgamentos de valores.
- Sumário Técnico (para audiência técnica/praticantes de ACV): deve incluir, no mínimo, o objetivo,o escopo com limitações e as suposições relevantes, além de um diagrama geral de fluxos do sistema estudado. Deve indicar claramente, ademais, o que foi atingido pelo estudo. Os principais resultados das fases de ICV e AICV devem ser apresentados de maneira a assegurar o uso apropriado da informação, assim como afirmações relevantes sobre qualidade dos dados, suposições e julgamentos de valores.
- Parte principal (para praticantes de ACV): Todas as fases do estudo de ACV devem ser apresentadas de forma detalhada e transparente, incluindo o objetivo completo do estudo, o escopo detalhado, os resultados da análise de inventário, a avaliação de impacto de ciclo de vida, os resultados, a interpretação dos dados, as conclusões e recomendações.
- Anexos (para praticantes de ACV): Os anexos servem para documentar elementos de natureza mais técnica, que poderiam interromper o fluxo das partes principais do relatório de ACV, mas que devem ser usados como referência, como, por exemplo, as memórias de cálculo dos inventários e AICV.
- Relatório confidencial: deve conter todos os dados e informações confidenciais que não podem ser disponibilizados publicamente. Esse relatório deve ser disponibilizado para revisores críticos, sob condições de confidencialidade.

1.4.6. Revisão Crítica

A revisão crítica deve assegurar, entre outras coisas, se:

Os métodos utilizados pela AICV são consistentes em relação à documentação de orientação e também com as normas NBR ISO 14040 (2009a) e NBR ISO 14044 (2009b);

- Os métodos utilizados para a ACV são válidos científica e tecnicamente;
- Os dados usados são apropriados em relação ao objetivo do estudo;
- A interpretação reflete as limitações identificadas e o objetivo do estudo;
- O relatório do estudo é transparente e consistente.
- A etapa de revisão crítica é de extrema importância para assegurar a confiabilidade e robustez de um estudo de ACV, uma vez que, sendo avaliado por terceira parte, possíveis falhas de documentação ou de definições e análises do estudo podem ser identificadas e sanadas previamente à publicação do relatório para audiência externa. A importância é ainda maior em se tratando de estudos comparativos a serem divulgados ao público, nos quais se deve evitar ao máximo a possibilidade de publicação de resultados e conclusões enganosos.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14040* – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14044* – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). *Norme NF P01-010* – Qualité environnementale des produits de construction, Déclaration des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction et de leur contribution aux impacts environnementaux d'un ouvrage donné. Paris, 2004.

BARE, J. C.; NORRIS, G. A.; PENNINGTON, D. W.; MCKONE, T. *TRACI*: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. Journal of Industrial Ecology 6(3), pp. 49-78. 2003.

BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. *Life cycle assessment in buildings*: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. Building and Environment, vol. 44, pp. 2510-2520. 2009.CHEVALIER, J.L.; LE TENO, J.F. *Requirements for an LCA-based model for the evaluation of the environmental quality of building products*. Building and Environment, vol. 31(5), pp. 487–91. 1996.

ERLANDSSON, M.; BORG, M. *Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services* – today practice and development needs. Building and Environment, vol. 38, pp. 919-938. 2003.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE OF THE (EC-JRC). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. 2010a.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE OF THE (EC-JRC). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Analysis of existing Environmental Impact Assessment Methodologies for use in Life Cycle Assessment* – Background document. 2010b.

European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA). *List of tools: Internet site developed by the European Commission*. Direction Generale. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability, 2010. Disponível em http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/toolList.vm. Acesso em: 01 abr. 2013.

FRANKE, C. *Ciclo de vida de produtos*. Trabalho desenvolvido entre a Universidade Técnica de Berlin (TUBerlin) e o Grupo de Adequação Ambiental em Manufatura (AMA). Disponível em http://www.numa.org.br, 2004.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. *ReCiPe 2008* – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Available at: http://lcia.wik.is. 2008.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA. *Eco-indicator 99*, a damage-oriented method for lifecycle Impact assessment, methodology report. 2000.

GUINÉE, J. B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A.; VAN OERS, L.; SLEESWIJK, A. W.; SUH, S.; UDO DE HAES, H. A.; DE BRUIJN, J. A.; VAN DUIN, R.; HUIJBREGTS, M. A. J. *Handbook on Life Cycle Assessment*: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 2002.

IMPACT WORLD +. *Impact World* +: Presentation. Disponível em: http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php. Acesso em: 19 out. 2012.

JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; AGOPYAN, V.. *Critérios de sustentabilidade para seleção de materiais e componentes* – uma perspectiva de sustentabilidade para países em desenvolvimento. Journal of Building Environment, 2006.

JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAVET, J., REBITZER, G.; ROSEMBAUM, R. *Impact 2002:* A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int J. of LCA 8 (6) 324-330. 2003.

LEMAIRE, S.; CHEVALIER, J.; GUARRACINO, G.; HUMBERT, H. *Using the French EPDs to compare and to choose building products*. CIB World Building Congress 2007: Construction for Development, Cape Town, 21-25 May 2007.

MULLER-WENK, R. *The Ecoscarcity Method as a Valuation Instrument within the SETAC* – Framingwork, in: Udo de Haes/Jensen/Klöpffer/Lindfors (Ed.): Integrating Impact Assessment into LCA, SETAC-Europe, Brussels 1994, p. 115-120.

POTTING, J.; HAUSCHILD, M. *Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology*. Environmental News n. 80. The Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2005.

SILVA, V. G. *Uso de Materiais e Sustentabilidade*. Revista Sistemas Prediais (Online), julho, 2007. Disponível em <http://www.nteditorial.com.br/revista/Materias/index.asp?RevistaID1=7& Edicao=22&id=200&TopicoID=318>. Acesso em: 10 ago. 2009.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. *Avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil*. Coletânea Habitare – vol. 7 – Construção e Meio Ambiente. Porto Alegre, 2006.

VERBEECK, G.; HENS, H. *Life cycle inventory of buildings*: A calculation method. Building and Environment, vol. 45, pp. 1037-1041. 2010a.

VERBEECK, G.; HENS, H. *Life cycle inventory of buildings*: A contribution analysis. Building and Environment, Volume 45, Issue 4. 2010b.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. *Environmental Assessment of Products*. Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers. v. 1 e 2. 1997.

A Rede INOVATEC/Finep e sua Contribuição ao SINAT/PBQP- Habitat e à Norma Brasileira NBR 15575

Metodologias para Avaliação da Estabilização/Solidificação (Encapsulação) de Resíduos Industriais para Uso em Matrizes Cimentícias, Poliméricas e Cerâmicas e para Desenvolvimento de Produtos para a Construção Civil

Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização

Metodologia para Avaliação do Potencial Deletério de Resíduos em Matrizes Cimentícias: Contribuição à Norma de Desempenho

Ensaios Acelerados Empregados na Indução da Corrosão por Cloretos – Análise a Partir de Concretos com a Incorporação de Resíduos de Tijolos Moídos

Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaios Acelerados com Ciclos Térmicos

Avaliação de Metodologias de Envelhecimento em Painéis de Partículas de Bagaço de Cana-de-açúcar para Aplicação em Sistemas Construtivos

Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto

Comportamento Estrutural de Alvenarias Construídas com Blocos de Terra Compactados (BTC)

Avaliação da Composição de Solo para Uso em Taipa - Estudo de Caso

Critérios para Avalição do Potencial de Desmonte e Reciclagem de Materiais de Sistemas Construtivos Inovadores

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Construtivos