

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**
Manuel Fernández Cánovas – **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Presidente

Carmen Andrade Perdrrix, **España**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Iván Escalante García, **México**

Vicepresidente Técnico

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Vicepresidente Administrativo Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

Gestor

Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional, Unidad Mérida (CINVESTAV IPN –
Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe:

Arq. Margita Kliwer
Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”
Asuncion, **Paraguay**

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de
Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo Leon, **México**

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas Universidad
Politécnica de Madrid. Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires. Buenos
Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional (Unidad Saltillo) Saltillo, Coahuila,
México.

Dr. Mauricio López.

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón Centro de Estudios de

Corrosión Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco Universidad

Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Mexicano del Transporte / Universidad Marista de
Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –
INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

RAV9N2, mayo – agosto, 2019

Mensagem do Editor Chefe

**REVISTA LATINOAMERICANA DE
CONTROLE DE QUALIDADE, PATOLOGIA E
RECUPERAÇÃO DA CONSTRUÇÃO**

<http://www.revistaalconpat.org>

É motivo de satisfação e alegria para a equipe da Revista ALCONPAT ver publicado o segundo número de nosso nono ano.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é a publicação de casos de pesquisa e produção referenciada (investigações básicas ou aplicadas, revisões bibliográficas, ou documentais, relacionados com os temas de nossa Associação, ou seja controle de qualidade, patologia e recuperação das construções.

Esta edição V9N2, começa com um trabalho procedente do **Brasil**, onde Graziela Pereira da Silva e colegas, apresentam a influência da termografia infravermelha em paredes de alvenaria para detectar manifestações patológicas. Realizou-se uma revisão bibliográfica com seleção e triagem de artigos. Foram revistas as propriedades térmicas e seu comportamento, pontes térmicas, gradientes térmicos e as infiltrações de ar. Foi detectado a importância de cuidados relativos a execução dos experimentos e à precisão das medições. A conclusão situa a termografia infravermelha como um método simples e confiável.

No segundo trabalho, do **México**, Pedro Jesús Poot Cauich e colegas abordam a mecânica de aderência, o efeito de reforço e durabilidade das aplicações de materiais compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) em vigas. A aplicação de materiais de CFRP tem sido amplamente descrita, mas o foco principal tem se restringido aos parâmetros gerais de falha. O primeiro problema é fortalecer a capacidade de reforço de CFRP para vigas de concreto. O segundo é a relação tensão-deslocamento local da interface, ou seja, o deslizamento local concreto/resina. O último problema é a durabilidade dos compostos de CFRP, quando expostos a um ambiente úmido e com temperaturas elevadas. O papel e a mecânica da aderência do concreto ao CFRP e uma boa compreensão da interface entre o CFRP e o comportamento do concreto são o fator chave para o controle das falhas de falha de aderência entre a superfície da viga de concreto armado, reforçada com o CFRP.

O terceiro trabalho desta edição é do **Brasil**, onde Ronaldo Medeiros-Júnior e colegas enfrentam as seguintes propriedades de concreto: absorção de água (por imersão e capilaridade), resistividade elétrica e resistência à compressão. Os resultados mostraram que o concreto com maior teor de pozolana apresenta maior resistividade elétrica/iônica e absorção por capilaridade, para a relação água-cimento menor que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução do diâmetro dos poros. Entretanto, para a relação água-cimento de 0,60, o concreto com menor teor de

pozolana apresentou maior absorção por capilaridade. Além disso, a resistência à compressão e a resistividade elétrica são inversamente proporcionais à relação água/cimento, na qual a absorção de imersão e capilaridade são diretamente proporcionais à relação água/cimento. Foram encontradas correlações com altos coeficientes de determinação.

No quarto artigo procedente do **México**, José Trinidad Pérez-Quiroz e colegas avaliaram o desempenho contra a corrosão de soldas de metais dissimilares, utilizando como metais base o aço carbono ASTM A 615 soldado ao aço inoxidável austenítico AISI 304, e como metal de fusão o eletrodo de entrada ER-309L, aplicado sobre um corte bisel a 45 °. Metade dos espécimes foram submetidos a um processo de fusão de eletrodo tipo Inconel 182. Os resultados eletroquímicos demonstram que, apesar dos defeitos apresentados na união soldada, estes tendem a ser passivos em meio alcalino, sendo os espécimes com material fundido menos deteriorados por efeito da corrosão assim como sua resistência mecânica é mais elevada.

O quinto artigo, de Daniel V. Ribeiro e Rafaela Oliveira Rey, vem do **Brasil**. Foram avaliadas as condições dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador em relação ao risco da reação álcali/agregado (RAA), utilizando adições minerais, a fim de mitigar essa reação. Utilizou-se o método acelerado das barras de argamassa, especificadas pela ABNT NBR 15577-4:2008. Os resultados indicam que as areias da região metropolitana de Salvador apresentam baixa reatividade, porém, as britas apresentaram alta reatividade. Este estudo, apesar de estar limitado às condições utilizadas, é original e inovador no Estado da Bahia e apresenta também, originalidade por empregar altos conteúdos de adições superiores ao convencional. Concluiu-se que a Microsilica, se usada em níveis muito elevados, pode até mesmo acelerar a reação.

O sexto trabalho desta edição é escrito por M. Rendon Belmonte e por colegas do **México**. Eles descrevem propriedades relativas à durabilidade de cinco misturas de concreto com diferentes conteúdos de cinzas volante ativadas (CVA) e cimento Portland tipo CPC 40. Os testes realizados foram: velocidade de propagação de ultrassom, resistividade elétrica aparente, permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão. Os resultados indicaram que a qualidade de todas as misturas foi durável, o desenvolvimento da resistividade elétrica e a diminuição do nível de permeabilidade ao íon cloreto foi favorecida pelo conteúdo de adição. Quanto à resistência à compressão, observou-se que o maior teor de CVA foi menor. O percentual máximo de reposição de CVA para atender aos critérios atuais de durabilidade foi de 65%.

No sétimo trabalho, proveniente do **Brasil**, Denis Cardoso Parente e colegas avaliam o uso de água de reuso de estações de tratamento de efluentes na fabricação de blocos ocios de concreto. O uso desses blocos tem sido adotado como uma opção para

racionalizar a composição de alvenaria tradicional e estrutural, permitindo a redução de perdas de material e camadas de revestimento. O estudo inclui a análise das propriedades físicas e mecânicas dos blocos dosados com o efluente e os resultados mostram que essas propriedades permanecem inalteradas, o que pode viabilizar o uso do efluente.

No oitavo trabalho, vindo de **Cuba**, Jennifer Lopez Guevara e os colegas relatam que a armadura do coro alto do convento de Santa Clara de Assis tem sido vítima de umidade e do ataque de agentes bióticos e abióticos que causaram sua degradação gradual. Para a identificação dos processos patológicos associados a esses agentes e seu caráter patrimonial, foi realizada uma investigação e diagnóstico com base em uma inspeção organoléptica e testes superficiais com os instrumentos disponíveis, o que permitiu identificar as causas. Através da modelagem da estrutura no programa SAP 2000 foram obtidos os esforços solicitantes aos quais são submetidos os elementos estruturais. De posse desses esforços foram calculadas as soluções propostas para os problemas patológicos identificados. Fundamentalmente para a perda da ligação entre os apoios e a corda (tirante) da tesoura.

O artigo que encerra a edição é de Henrique Jorge Nery Lima e de colegas do **Brasil**, que apresentam um estudo de caso de manifestações patológicas em estruturas de concreto, localizadas no eixo rodoviário norte de Brasília, através da metodologia GDE/UnB, que qualifica e quantifica a degradação dos danos estruturais. Caracterização do estado geral da estrutura com o objetivo de servir como subsídio para tomada de decisão em termos de intervenções rotineiras, para estender a vida da estrutura. A rotina metodológica consistiu na realização de inspeções no campo, na elaboração de um catálogo das manifestações estruturais patológicas com a caracterização de levantamentos fotográficos das manifestações patológicas, classificação de acordo com fatores de ponderação e fatores de intensidade de dano da estrutura de acordo com a metodologia GDE/UnB para obras especiais e de arte, com cálculo e classificação geral de danos estruturais.

Estamos confiantes de que os artigos desta edição constituirão uma referência importante para os leitores envolvidos com questões de avaliações e caracterizações de materiais, elementos e estruturas. Agradecemos aos autores que participam desta edição por sua disposição e esforço para apresentar artigos de qualidade e atender os prazos estabelecidos.

Pelo Conselho Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



CONTENIDO

Página

REVISÃO

G. P. Silva, P. I. B. Batista, Y. V. Povóas: O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica. 117 - 129

P. J. Poot Cauch, R. Martínez-Molina, J. L. Gamboa Marrufo, P. J. Herrera Franco: Adesão, fortalecimento e problemas de durabilidade na restauração de varredura Concreto Reforçado (CR) usando o Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão. 130 - 151

PESQUISA BÁSICA

R. A. Medeiros-Junior, G. S. Munhoz, M. H. F. Medeiros: Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. 152 - 166

J. C. I Ramirez -Soto, J. T. Pérez-Quiroz, J. M. Salgado-López, M. Martínez-Madrid, T. Pérez-López, M. Rendón-Belmonte, E. Alvarez-Alfaro: Estudo do comportamento eletroquímico da junta soldada em aço ASTM A 615 e aço inoxidável AISI 304 com manteiga de Inconel 182. 167 - 184

D. V. Ribeiro, R. O. Rey: Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Alcalis-Agregado (RAA) 185 - 199

M. Rendón Belmonte, M. Martínez Madrid, R. V. Martínez Pérez, J. T. Pérez Quiroz: Durabilidade de misturas de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativas. 200 - 214

A. Plaza Meurer, R. Alves Amorim, L. Carvalho Quintanilha, D. Cardoso Parente: Reuso de efluentes na fabricação de blocos de concreto para alvenaria de vedação. 215 - 227

ESTUDOS DE CASO

J. L. Guevara, Y. A. Toirac, C. M. C. Marisy: Inspeção ao convento de Santa Clara de Asís em Havana. Estudo do seu estado de conservação e propostas de intervenção. 228 - 246

H. J. N. Lima, R. S. Ribeiro, R. A. Palhares, G. S. S. A. Melo: Análise de manifestações patológicas do concreto em viadutos urbanos. 247 - 259



O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica

G. P. Silva^{1*} , P. I. B. Batista¹ , Y. V. Povóas¹ 

* Autor de Contato: graziela.ps04@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.341>

Recepção: 05/08/2018 | Aceitação: 09/11/2018 | Publicação: 30/04/2019

Editor Associado Responsável: Dr. Paulo Helene

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar a utilização da termografia infravermelha em paredes de alvenaria no auxílio do desempenho térmico. Foi realizado uma revisão sistemática através de pesquisa com busca automática e snow-balling, seleção e peneiramento dos artigos para restringir os artigos ao tema desejado. Após isto, foi estudado sobre a termografia infravermelha nas manifestações patológicas, as propriedades térmicas e seu comportamento, pontes térmicas, diferença de temperatura e infiltrações de ar. De uma forma geral é necessário ter alguns cuidados durante a execução dos experimentos e medições. Ademais foi mostrado que a termografia infravermelha é uma técnica complexa e precisa de ser utilizada.

Palavras-chave: termografia infravermelha; desempenho térmico; manifestações patológicas; propriedades térmicas; vazamentos de ar.

Citar como: Silva, G. P., Batista, P. I. B., Povóas, Y. V. (2019), "*O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica*", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 117 – 129, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.341>

¹ Universidade de Pernambuco, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

The usage of infrared thermography to study thermal performance of walls: a bibliographic review

ABSTRACT

This article aims to present the influence of infrared thermography on masonry walls to detect pathological manifestations. A systematic review was carried out through research with automatic search and snow-balling, selection and sifting of articles to restrict them to the desired theme. After that, infrared thermography in the pathological manifestations was studied along with the thermal properties and their behavior, thermal bridges, temperature difference and air infiltrations. In general, some care must be taken during the execution of experiments and measurements. It has also been shown that infrared thermography is a complex technique and should be used.

Keywords: infrared thermography; thermal performance; pathological manifestations; thermal properties; air leakage.

Uso de termografía infrarroja para estudiar el desempeño térmico de paredes: una revisión bibliográfica

RESUMEN

Este artículo tiene por objetivo presentar la influencia de la termografía infrarroja en paredes de albañilería para detectar manifestaciones patológicas. Se realizó una revisión sistemática a través de investigación con búsqueda automática y snow-balling, selección y cribado de los artículos para restringir los artículos al tema deseado. Después de esto, fue estudiado sobre la termografía infrarroja en las manifestaciones patológicas, las propiedades térmicas y su comportamiento, puentes térmicos, diferencia de temperatura e infiltraciones de aire. En general es necesario tener algunos cuidados durante la ejecución de los experimentos y mediciones. Además, se ha demostrado que la termografía infrarroja es una técnica compleja y precisa de ser utilizada.

Palabras clave: termografía infrarroja; rendimiento térmico; manifestaciones patológicas; propiedades térmicas; fugas de aire

1. INTRODUÇÃO

As paredes podem ser avaliadas a fim de verificar uma melhor qualidade para o desempenho térmico. Há diversas formas de medição de acordo com a funcionalidade ou parâmetro que deseja ser observado, dentre elas: resistência mecânica, absorção de água, capilaridade, desempenho térmico, características geométricas etc., são alguns aspectos que podem ser avaliados para obtenção de um desempenho satisfatório das paredes de uma edificação.

A Norma de Desempenho 15575 (ABNT, 2013) e a norma base sobre Desempenho térmico 15220 (ABNT, 2005) se complementam, pois, a primeira define desempenho como “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas” e a segunda os conceitos térmicos, propriedades e seus cálculos.

A termografia infravermelha é uma técnica de vistoria não invasiva e não destrutiva. Sua captura é feita através de aparelhos que mostram a radiação infravermelha, através de mecanismos de fácil utilização, rápida e de forma complexa. A utilização da técnica tem se tornado mais comum graças à sua natureza rápida, precisa e sem contato que permite ser utilizada em uma ampla gama de casos (Kylili et al., 2014). A termógrafa infravermelha utiliza uma câmera para medir a radiação infravermelha emitida de um objeto e converter em um padrão de radiação térmica, que é invisível ao olho humano, em uma imagem visível (Clark et al., 2003).

Muitos pesquisadores têm usado as técnicas da termografia infravermelha para diversas utilizações (Bagavathiappan et al., 2013) como por exemplo, medição de emissividade, determinação do

coeficiente global de transferência de calor, entre outras aplicações, demonstrando assim que isto tem potencial positivo (Porras-Amores et al., 2013). O’Grady (2017a) traz um dado importante em sua pesquisa: cerca de 40% da energia consumida na Europa advém de edificações. O estudo prévio do comportamento térmico das paredes evita erros na fase de construção. Depois de construído, sua verificação *in loco* possibilita encontrar possíveis patologias e/ou deficiências de projeto que levam a uma redução de seu desempenho térmico.

Na Argentina, cerca de um terço da energia produzida é para o gerenciamento dos edifícios, sendo que metade desta é direcionada para aquecimento e resfriamento e mais de 30% restante é perdido por isolamento térmico insuficiente ou telhados e paredes que tem uma propensão a apresentar superaquecimento no verão e vazamentos de calor no inverno (Marino et al., 2016).

De acordo com a Green Building Council Brasil (2015) tomando como base o balanço energético nacional de 2015, de toda a energia elétrica demandada, cerca de 50% era para edificações. Além disto, o consumo de energia elétrica no Brasil, excluindo as perdas, chega a 516,6 TWh, deste valor 258 TWh, ou o equivalente a R\$ 60 bilhões são consumidos apenas pelas edificações. Segundo a EIA (2018) os Estados Unidos em 2017, por volta de 39% da energia total produzida foi consumida por residências e setores comerciais. Nos países da União Européia, o setor terciário e residencial consome cerca de 41% de toda energia produzida, sendo que 55% é calor. Similarmente na Sérvia, onde cerca de 50% da energia total consumida vai para as edificações, só que 60% dela é calor (Tanic et al., 2015). Diante dessas informações, nota-se a grande importância do estudo do comportamento térmico de paredes.

As edificações rurais na China consomem muita energia e tem um desempenho térmico pobre devido ao tipo e estado dos materiais de construção (Diao et al., 2018). Então, a detecção e quantificação das perdas de calor através das edificações se tornam relevantes por ser um tema de extrema importância para a sociedade.

Ainda há uma carência de estudos sobre o assunto, dificultando a pesquisa e um melhor entendimento sobre a abrangência da termografia infravermelha. Por ser um assunto que tem mais de 25 anos de pesquisas relevantes, pesquisadores estão investindo neste tema intencionalmente para explorar toda a extensão da utilização da termografia infravermelha. Devido a isto, este trabalho tem por objetivo realizar uma revisão sistemática dos trabalhos existentes sobre a utilização da termografia infravermelha para o conhecimento dos parâmetros, suas propriedades e a sua influência no desempenho térmico de paredes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico da termografia infravermelha

A termografia infravermelha começou a ser utilizada para outros fins e não para a construção civil. Os seus princípios foram descobertos por acaso enquanto se tentava solucionar um problema astronômico, por volta de 1800, pelo cientista William Herchel (Barr, 1961), sendo aperfeiçoado para sua utilização em diversos setores ao longo dos anos (Lucchi, 2018). Por volta de 1830, o investigador italiano, Melloni, descobriu que o sal (NaCl) em cristais naturais grandes o suficiente para ser transformado em lentes e prismas, tornou-se o principal infravermelho até a década de 1930, quando chegou a era do cristal sintético (Flir, 2017). O primeiro detector quântico foi desenvolvido entre 1870 e 1920 e foi baseado nas interações entre as radiações, aumentando a precisão e reduzindo consideravelmente o tempo de resposta (Smith et al., 1958). A termografia foi muito aperfeiçoada durante a segunda guerra mundial, mostrando a importância da tecnologia principalmente à noite e a sua ampliação do uso das imagens infravermelhas no setor da construção se deu por volta dos anos 2000, com o emprego de titânio de bário-estrôncio e micro bolômetro (Lucchi, 2018). O seu uso aumentou drasticamente nos últimos anos principalmente em obras de restauração, construção de edifícios e vistorias (Kylili et al., 2014; Bianchi et al., 2014) devido às melhorias físicas e tecnológicas como redução no tamanho do equipamento, redução de custos e

melhorias na resolução, sensibilidade e precisão, operacionalidade e portabilidade (Meola, 2012). A utilização tem crescido bastante nos últimos 15 anos, principalmente para a engenharia civil e restaurações de prédios históricos, facilitando assim uma difusão das legislações europeias não só para eficiência energética, mas também para auditoria energética das edificações (Lucchi, 2018). Muito se tem aprendido com a termografia infravermelha, mas mesmo depois de se passarem 30 anos desde o início de sua utilização ela ainda não teve sua extensão inteiramente explorada (Grinzato et al., 2002; Albatici e Tonelli, 2010).

2.2 Normatização da termografia infravermelha no Brasil e no mundo

Ao redor do mundo, a utilização da termografia infravermelha vem sendo difundida há alguns anos. Tanto que já existe normas como as da ASTM, ISO e da União Europeia, que regulamentam a utilização da termografia infravermelha em edificações, suas propriedades e sua utilização é amplamente recomendada (ASTM, 2013a; ASTM, 2015a; ASTM, 2013b, ASTM, 2015b; ISO, 2008; ISO, 2015; EN, 1999).

No Brasil não há uma norma que regule a sua utilização tendo que, muitas vezes, se recorrer às normas internacionais ou até a adaptações de utilizações em outras áreas.

A norma brasileira que tem algum aspecto com a utilização da termografia infravermelha é a NBR 15575 – Norma de Desempenho (ABNT, 2013a), na qual é dividida em 6 partes e fala sobre os aspectos para um bom desempenho da edificação, inclusive o térmico. Porém não faz referência a nenhum ensaio de campo para verificação deste desempenho. Algumas normas brasileiras que fazem referência à termografia infravermelha, dentre elas destacam-se a NBR 15572 (ABNT, 2013b), NBR 15763 (ABNT, 2009) e NBR 15866 (ABNT, 2010), que abrangem as técnicas para a sua utilização.

Segundo Marques e Chavatal, (2013) o comportamento térmico da casa depende substancialmente da atividade interativa entre as paredes externas, teto e piso. Hoje em dia, ao redor do mundo, as paredes são construídas com inúmeros materiais em diversas camadas (Robinson et al., 2017). No Brasil, grande parte das edificações ainda utilizam os materiais tradicionais, como concreto, blocos cerâmicos e gesso. Todavia, atualmente, pesquisadores estão explorando outros materiais como EVA (Silva et al., 2012) e fibras vegetais (Savastano Junior e Pimentel, 2000), em diferentes percentuais inseridos nos materiais tradicionais, para o auxílio em seu comportamento sem retirar suas características.

2.3 Metodologia

De acordo com Maldague (2001), a termografia infravermelha é dividida em duas técnicas principais, a ativa e a passiva. Lerma et al. (2018) dizem que as técnicas não entram em contato com o substrato a fim de evitar danos ou recuperações futuras.

A técnica passiva é aquela na qual a medição da temperatura é feita em condições normais, objetos que tem energia térmica própria ou de alguma forma armazenam energia por uma fonte natural de calor, existindo uma diferença de temperatura entre o objeto estudado e o meio (Kylili et al., 2014; Viégas, 2015). Na técnica de termografia infravermelha ativa, é necessária uma fonte externa de energia artificial, gerando uma variação de temperatura sobre o objeto (Viégas, 2015). A utilização da termografia passiva irá depender da energia disponível na natureza, podendo muitas vezes sofrer inerência do vento, sombra, condições climáticas e ambientais. Como o princípio da termografia ativa é a utilização de fontes de calor artificial, a utilização de lâmpadas no ambiente pode ser considerada uma alternativa.

Dentro da termografia ativa existem algumas técnicas que se diferenciam pela natureza dos estímulos aplicados sendo por lâmpadas de aquecimento ou ondas elásticas, também chamadas de ultrassom (Kylili et al., 2014), sendo assim chamadas de *Pulsed*, *Lock-in*, *Pulsed-Phase* (Maldague, 2001 apud Rocha, Póvoas, 2017), *Laser Spot Array Thermography* (Pei et al., 2016), *Principal Component Thermography* (Milovanovic et al., 2016; Rajic, 2002), entre outros.

Desde o início da utilização da termografia infravermelha na construção civil, ela tem sido

utilizada no monitoramento de edificações tanto de forma quantitativa quanto qualitativa (Grinzato e al., 2002). A análise qualitativa é considerada uma técnica da termografia infravermelha que fornece laudos instantâneos, pois o enfoque dela é o perfil e não os valores (ITC, 2014 apud Viégas, 2015), sendo uma comparação do valor relativo ao acesso local em relação a um ponto de referência (Bagavathiappan et al., 2013).

Na termografia quantitativa é possível definir a seriedade da situação do objeto estudado, sendo sempre a segunda análise a ser feita, pois a primeira deve ser a qualitativa, visto que a análise quantitativa possibilita a quantificação numérica dos parâmetros que estão sendo avaliados. Se não for feito desta forma, está sendo feita somente uma análise comparativa (ITC, 2014 apud Viégas, 2015). A análise quantitativa dos dados permite uma determinação precisa da temperatura de um ponto ou de uma região (Bagavathiappan et al., 2013).

Dentro do tipo de análise feita, diversos métodos são utilizados para medir o desempenho térmico das edificações como o Laser spot thermography (LST) (PEI et al., 2016), heat flux meters (HFM) (Danielsky e Fröling, 2015), técnica de termo visão infravermelha (Albatici e Tonelli, 2010), entre outros.

Essas técnicas são utilizadas para a medição de pontes térmicas (O'grady, 2017a; Bianchi et al., 2014; Brás et al., 2014), infiltração de ar (Lerma et al., 2018), transmitância térmica (Simões et al., 2014; Donatelli et al. 2016), emissividade térmica (Abatici et al., 2013; Ciocia e Marinetti, 2012), e outras propriedades.

A diferença dos materiais e da umidade presente neles, das emissividades a ser analisada, os ruídos causados pelas leituras de temperatura reflexivas, são alguns dos fatores que interferem na análise da termografia infravermelha.

3. DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES

O aquecimento global tem trazido um crescente aumento na temperatura. Ao observar este fato, o setor da construção civil busca melhorias na eficiência energética através de alternativas que evitem o desconforto térmico das edificações (Cani et al., 2012). A Diretiva Europeia 2010/31/ UE (European Parliament and of the Council, 2010) traz uma descrição sobre como a eficiência energética dos edifícios exerce um papel planejado na obtenção do consumo quase zero. Aversa et al. (2017) diz que “para isto ocorrer, análise ou auditoria energética é uma ferramenta eficaz e rápida para novas construções, projetos e na tomada de medidas sobre a renovação energética dos edifícios existentes que geralmente são caracterizados por ineficiência que levam ao desperdício de energia”. Devido ao lançamento da Norma de Desempenho no Brasil, a NBR 15575 (ABNT, 2013), cada vez mais tem se pensado em conforto térmico. O conforto térmico é definido como a condição da mente que expressa a satisfação do usuário com um ambiente (Ghahramani et al., 2018).

3.1 Vazamentos de ar

Lerma et al. (2018) realizaram um trabalho com o objetivo de promover um discussão sobre as oportunidades e restrições de usar a termografia infravermelha ativa para detectar vazamentos de ar. O potencial é avaliado tanto em uma abordagem qualitativa, comparando os termogramas da termografia infravermelha passiva com a ativa. Além da abordagem quantitativa, testando métodos de interpretar numericamente os termogramas. Foi realizado experimento em um quarto de uma construção de 1980, no Noroeste de Portugal. O experimento foi realizado em 8 dias com condições climáticas diferentes e a medição foi feita tanto do lado interno quanto externo. Na análise qualitativa foi detectado, na abordagem ativa, que as infiltrações de ar começam a ser visíveis quando a diferença de pressão é de 25 Pa, e na abordagem passiva, a diferença de pressão precisa ser maior para haver vazamentos. Na análise quantitativa foram utilizadas duas diferentes posições da câmera para detecção dos vazamentos de ar, a câmera perpendicular (PP) e a câmera paralela

(PL) ao rolo do obturador de mão. A primeira técnica detectou os vazamentos de ar através da diferença de pressão e a segunda detectou os locais com a temperatura mais fria como pontos de fuga de ar. Os resultados mostraram que na análise quantitativa o cenário PP permitiu um discurso mais detalhada. Na análise qualitativa, a termografia ativa, mostrou mais claramente os resultados. Grinzato et al. (1998) utilizaram uma metodologia que resultou em um discurso da detecção e avaliação das falhas em edifícios. Para detecção dos vazamentos de ar, foi verificado em uma parede maciça com defeito em gesso a termografia infravermelha quantitativa, produzindo imagens antes e depois dos vazamentos para verificação. Verificou-se que um estímulo térmico, seja irradiação solar, fluxo de ar ou fluxo radiante de uma fonte artificial, seria útil na detecção de defeitos. A principal desvantagem da análise transiente é o aumento considerável do tempo de processamento, dificilmente alcançado sem equipamento exclusivo.

3.2 Pontes térmicas

As pontes térmicas são definidas como “todas e quaisquer zonas da envolvente de um edifício nas quais a resistência térmica é significativamente alterada relativamente à zona corrente da envolvente” (ISO, 2008 apud Castro, 2010). As alterações ocorridas na resistência térmica podem ser provocadas pela total ou parcial inserção de materiais com diferente condutividade térmica, pela variação da sua espessura e/ou pela desigualdade das suas áreas interna e externa, como acontece no caso das ligações entre paredes e pavimentos (Castro, 2010).

Asdrubali et al. (2012) trazem em seu trabalho, uma análise quantitativa, através da utilização da termografia infravermelha, com um experimento comparativo de uma ponte térmica isolada e outra não. O artigo propõe uma metodologia para realizar uma análise quantitativa de alguns tipos de pontes térmicas, através de levantamentos termográficos simples e posterior processamento analítico. A ponte térmica selecionada foi dada através da diferença da estrutura e do vidro da janela posta. Esta parede foi colocada entre 2 salas, com diferença de temperatura de 20°C. Foram consideradas 2 análises. A diferença entre o fator de incidência de pontes térmicas em relação às duas comparações é igual a 1606 para o isolado e 2000 para o não isolado. O fator de influência calculado in situ, é igual a 2,111 e o fator de incidência das pontes térmicas calculado pelo programa FLUENT é igual a 1,262. Portanto, há uma redução na perda de calor da ponte térmica de cerca de 40%. Para um melhor desempenho foram realizadas simulações para uma perda de calor global no inverno e achou-se perda de calor de 4684 W, 13,4% dos quais devido à ponte térmica. A correção desta ponte térmica reduziria a perda de calor para um valor de 4307 W e a incidência da ponte térmica para 8,8%.

Bianchi et al. (2014) utilizaram uma análise quantitativa da termografia infravermelha na medição em campo com o objetivo de avaliar as perdas de energia através de uma edificação de 10m² no qual foram avaliados as paredes externas, o teto e o piso. Para isto, foi feito um comparativo entre 9 fatores incidentes de pontes térmicas calculados e identificados. No geral a análise traz que as pontes térmicas aumentam a perda de calor através da edificação em 9%. Os principais resultados mostram que o procedimento é uma ferramenta confiável para quantificar a incidência de pontes térmicas. O’Grady et al. (2017a e 2017b), em seus dois trabalhos, trazem uma abordagem quantitativa e mostram a perda de calor pelas pontes térmicas através da diferença de temperatura e da transmitância térmica. Grinzato et al. (1998) trouxeram em sua pesquisa experimentos em três diferentes tipos de paredes: concreto, lã de rocha e painel sanduiche de concreto com uma barra cruzando a camada de isolamento. A finalidade foi a verificação do comportamento da ponte térmica na utilização da termografia infravermelha quantitativa. Veja a tabela 1 para obter mais informações.

Quadro 1. Resumo dos estudos sobre pontes térmicas

Autor	Metodologia	Principais Conclusões
Asdrubali, Baldinelli, Bianchi (2012)	Comparação dos resultados da termografia infravermelha quantitativa com dados obtidos por medidores de fluxo de calor e os resultados de uma análise de volume finito.	O fator de incidência da ponte térmica descreve corretamente o grau de dispersão da singularidade, quantificando o resultado da térmica correção de ponte.
Bianchi et al. (2014)	Utilização da termografia infravermelha quantitativa no monitoramento da área a ser estudada.	Aumento das perdas de calor de aproximadamente 9%
O'Grady, Lechowska, Harte (2017a)	Utilização da termografia infravermelha quantitativa sobre o estudo as pontes térmicas através da diferença de temperatura e transmissância térmica; metodologia experimental proposta pelo autor.	Vento impacta na perda de calor pela ponte térmica na parte plana. Para pontes térmicas com velocidades do vento entre 0,5 m/s e 4 m/s, o desvio relativo variaram entre + 5% e -9%.
O'Grady Lechowska, Harte (2017b)	Utilização da termografia infravermelha quantitativa sobre o estudo as pontes térmicas através da diferença de temperatura e transmissância térmica; metodologia experimental proposta pelo autor.	Funciona bem em laboratório. Depois de testada em condições reais, a metodologia pode ser aplicada em qualquer ponte térmica.

3.3 Propriedades térmicas

Jorge (2011) mostra que as paredes são elementos construídos visando separar os ambientes e quando a energia térmica é considerada, pode-se observar e quantificar através das propriedades térmicas. Como todo o objeto, as paredes têm propriedades mecânicas, químicas e térmicas. Nas propriedades térmicas, se destacam a transmitância térmica, difusividade térmica, resistência térmica, capacidade térmica, coeficiente de transferência de calor e da condutividade.

Aversa et al. (2017) propõe o estudo experimental do comportamento térmico de paredes opacas utilizando termografia ativa estimulada com o objetivo de avaliar a eficácia deste método em um comportamento dinâmico em paredes protótipos e verificação do seu sucesso para aplicação *in situ*. Ele compara uma parede de tijolos com um protótipo de parede com fibras de cânhamo. Notou-se claramente que as fibras de cânhamo implicaram em um aumento no fator de decréscimo (razão entre a transmitância térmica periódica e a transmitância térmica) de 0,87 para 0,92 para as paredes com as fibras. E também no aumento da diferença de tempo estimado. Conclui-se que diferentes resultados foram encontrados, sendo o próximo passo a medição *in situ*.

Grinzato et al. (2002) utilizaram termografia infravermelha e calcularam a difusividade térmica de uma amostra de tijolo de uma edificação antiga em alvenaria maciça, localizado no Arsenal Histórico de Veneza, realizando seis testes para auxiliar no mapeamento da umidade. Foi realizada primeiramente uma análise quantitativa com monitoramento contínuo e em seguida uma análise qualitativa para mapear a distribuição de umidade devido ao efeito de resfriamento da água por evaporação. O maior valor encontrado da difusividade térmica foi de $5.2800 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ e o menor foi de $5,1288 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$. Os resultados mostraram que a aplicação para o mapeamento da umidade, na ligação entre as paredes e no conhecimento da difusividade térmica de tijolos e gesso foi um sucesso.

Robinson et al. (2017) tem por finalidade estudar um método simples e de baixo custo para estimar a difusividade térmica efetiva em paredes estruturais de edificações. Para isto, utilizaram a termografia infravermelha como um método experimental e de baixo custo para o cálculo da difusividade térmica da parede de concreto sob condições controladas. A maior dificuldade

encontrada neste trabalho foi o controle da perda de calor pelos limites laterais da seção, sendo calculado in situ, visto que em ambiente controlado, os limites laterais foram isolados. Este experimento barato e combinado com um modelo matemático resultou em uma difusividade do concreto de $7,2 \text{ m}^2/\text{s} \pm 0,27 \text{ m}^2/\text{s}$, que é suficientemente preciso. Para este experimento os limites laterais foram isolados, mas concluiu-se que há uma grande perda de calor para esses limites.

Danielsky e Fröling (2015) investigaram uma metodologia quantitativa para analisar o desempenho térmico da envoltória de uma edificação em uma condição de estado não estacionária, incluindo duas fases. Eles fizeram experimentos com parede de madeira exposta a condições externas para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção, achando-se o valor de $2,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Os parâmetros externos utilizados foram velocidade do vento, umidade e a queda da neve, além do fluxo de calor através da parede foi assumido para obter condição de estado estável apenas esparsamente e durante períodos curtos, se em tudo. Foi utilizado o HFM e a termografia infravermelha para o cálculo do coeficiente de transferência de calor e da condutividade. Os resultados acharam-se compatíveis com diferenças entre os métodos de 4% e 3%, respectivamente para a condutividade e o coeficiente de transferência global, sugerindo que o método da termografia é mais precisa.

Donatelli et al. (2016) utilizaram termografia ativa para duas paredes protótipos em condições ambientais controladas e calcularam a transmitância térmica in situ, comparando com a transmitância térmica calculada por um programa de computador. Os resultados mostraram que as medições de temperatura feitas no software (FEA) são idênticas às de uma parede real e que o procedimento permite a medição da temperatura em paredes protótipo ao longo do ano, sem interferência climática.

O'Grady et al. (2017a) tiveram o intuito de elaborar um estudo com um método eficiente, não destrutivo, baseado em um levantamento termográfico infravermelho ao ar live, para determinar o desempenho da ponte térmica. Para isto, eles compararam os valores das propriedades térmicas, principalmente da transmitância térmica, obtidos pela termografia infravermelha quantitativa, com os valores de uma caixa quente e por um programa de computador para ajuste dos resultados. Foi calculada a transmitância térmica destes 2 métodos com 3 velocidades de ventos diferentes e feita a comparação entre eles. Para o cálculo da transmitância térmica, o coeficiente convectivo externo foi determinado usando a aproximação de Jürges e o número de Nusselt. Os resultados deste estudo demonstraram a adequação de ambas as abordagens para o cálculo do valor da transmitância térmica, enquanto a aproximação de Jürges é menos demorada. A termografia infravermelha é uma ferramenta efetiva para a determinação da transmitância térmica.

O'Grady et al. (2017b) propõem a utilização de um método não invasivo e fácil de usar para fornecer medições quantitativas do desempenho térmico real da ponte térmica. Estudaram as propriedades térmicas e utilizaram a termografia infravermelha quantitativa além de um programa experimental feito para quantificar as pontes térmicas e testado em uma caixa quente calibrada e controlada. Eles utilizaram o cálculo da transmitância térmica e da variação de temperatura. Foram realizadas 3 amostras, e o maior valor encontrado pela medição foi tanto pela hot box, quanto pela termografia. A amostra 1 com, respectivamente, $0,441 \text{ W}/(\text{mK})$ e $0,436 \text{ W}/(\text{mK})$. Pode-se concluir que depois de testada em laboratório e com excelentes resultados para as condições externas, as observações serão um desafio para a precisão das medições pela termografia infravermelha.

3.4 Medição de temperatura

Datcu et al. (2005) utilizaram a termografia infravermelha quantitativa para a medição de paredes com o objetivo de melhorar a medição da temperatura ambiente, tanto interna quanto externa. Os autores utilizaram um espelho infravermelho, que permite grandes medidas de temperatura superficial por termografia infravermelha sob condições próximas do ambiente com maior precisão. Para validar o método, um estudo experimental foi realizado em uma parede de multicamadas, que simulou um padrão de isolamento. A metodologia abordada no trabalho, permitiu quantificar a radiação média ao redor do objeto usando um espelho de alumínio altamente

reflexivo e difusivo. Então foram utilizadas duas fontes de calor, uma com 24 e outra com 48 W/m^2 e os resultados encontrados foram comparados com os resultados do programa FLUENT para o ambiente interno, e no ambiente externo, foram comparados a temperatura da parede, com a da janela e com o do receptor de calor.

Lai et al. (2015) utilizaram termografia infravermelha passiva quantitativa para análise da parede externa de um arranha-céu. Foram utilizadas quatro paredes de concreto com diferentes revestimentos. A metodologia foi utilizada quando houve mudanças de fluxo de calor e intensidade solar. Eles utilizaram câmeras termográficas e um programa computacional para a análise. Porras-Amores et al. (2013) utilizaram a medição da parede e superfície a fim de localizar a temperatura do ar no interior da edificação. O estudo realizado enfoca no design do sistema, sua caracterização e quantificação da sua precisão em diferentes configurações. Eles desenvolveram ao logo do trabalho uma termografia quantitativa que visa desenvolver uma técnica precisa de medição. Foi feito experimento na garagem e no subsolo. Notaram-se pequenas variações de temperatura, longitudinalmente.

4. CONCLUSÃO

A termografia infravermelha, como mostrado, pode ser utilizada combinada com outros métodos para efeito de comparação de valores e estruturas.

Observou-se uma grande aplicabilidade que a termografia infravermelha traz na identificação dos pontos de vazamentos de ar. A utilização da termografia ativa ou passiva vai gerar diferentes resultados e a técnica ativa mostra mais claramente os vazamentos de ar. As vantagens destacadas na utilização da termografia infravermelha para a detecção dos vazamentos de ar é que os estímulos externos auxiliam nesta detecção. As incertezas identificadas foram as dificuldades no maior tempo de processamento da análise transiente, que necessita de um equipamento exclusivo para isto, e a interpretação dos dados dos gráficos e histogramas de pressão versus temperatura. Para pesquisas futuras, a comparação entre as imagens térmicas da termografia infravermelha passiva com a ativa em uma abordagem quantitativa seria de grande utilidade.

As vantagens encontradas nas pontes térmicas são avaliações de forma simples e eficaz do efeito da ponte térmica na construção do comportamento da energia térmica. Simplicidade da geometria da edificação facilita para valores medidos e calculados. Em particular, a incerteza do consumo de energia na configuração com pontes térmicas deve ser levada em conta o erro singular devido à análise de cada ponte térmica. O fator de incidência da ponte térmica, analiticamente definido, depende da temperatura interna do ar e da temperatura interna da parede para que a câmera termográfica infravermelha possa ler. As aplicabilidades sobre pontes térmicas identificadas através das medições são possível fazer as intervenções para a melhoria dos isolamentos. Além disto, é um meio útil para analisar, aperfeiçoar e validar as ferramentas de simulação 3D especialmente projetadas para a avaliação do desempenho energético em edifícios, uma vez que elas são capazes de avaliar campos térmicos de paredes internas e externas.

Em relação às propriedades térmicas, o que mais se abordou foi o cálculo da transmitância térmica, havendo vários métodos para calcular e comparar os resultados, sendo que há diferenças significativas entre a transmitância térmica calculada e a medida *in situ*. Além do mais, alguns trabalhos enfatizaram que a medição *in situ* das propriedades térmicas seria mais bem executada no inverno. Há um estudo feito em laboratório, indicando que o procedimento implementado visa a medição em paredes protótipos durante o ano todo, sem preocupações com mudanças climáticas. As vantagens encontradas da termografia infravermelha são a multidisciplinariedade e integração dos resultados. Dentre a incerteza, que se repetiu em alguns trabalhos foi, como a metodologia aplicada se comportaria ou qual seria o seu resultado em condições normais, ou seja, sem ser controladas em laboratório. As dificuldades encontradas foram bastante pontuais, tanto em relação a utilização da termografia infravermelha em prédios históricos devido à diversos fatores ambientais, quanto às perdas de calor não controladas pelos limites laterais da seção sob teste. E

não houve restrições quanto à aplicabilidade para este tópico.

Muito utilizado também foi a abordagem da termografia infravermelha para a medição de temperatura, a qual apresentou um alto poder comparativo. A termografia infravermelha tem a vantagem de mostrar imagens com diferentes identificações, para medir a temperatura da superfície em uma grande área de um elemento em construção, fornecendo assim, dados mais representativos em relação às medições pontuais. As dificuldades encontradas foram no monitoramento quantitativo através da termografia convencional apresenta problemas na medição da temperatura de superfície e condições de ar no interior da edificação. Além disto, pode ser feita a sua aplicação em diversas superfícies.

De uma forma geral, a maior parte dos trabalhos sobre a termografia infravermelha trouxe a análise quantitativa. A abordagem ativa também é bastante explorada. Percebeu-se que há uma multidisciplinariedade entre os tópicos abordados, visto que alguns autores, em seus trabalhos, utilizaram a termografia infravermelha para falar sobre mais de um assunto, enriquecendo e complementando o estudo feito.

Alguns autores utilizaram programas computacionais, principalmente para a medição das propriedades térmicas, quando havia estudos experimentais facilitando a comparação entre valores experimentais e teóricos. Os trabalhos que utilizaram experimentos com protótipos e condições controladas e obtiveram sucessos, deixaram uma importante consideração de que o próximo passo seria a medição in situ. Então espera-se que a termografia infravermelha seja cada vez mais explorada e possa trazer melhores desempenhos e economia energética nas edificações.

5. REFERENCIAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2013a). “*NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1 – 6*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2013b). “*NBR 15572: Ensaio não destrutivos – Termografia Infravermelha – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2005). “*NBR 15220: Desempenho térmico das edificações Parte 1 – 5*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2010). “*NBR 15866: Ensaaios não destrutivos – Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos*”. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. (2009). “*NBR 15763: Ensaaios não destrutivos – Termografia – Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potencia*. Rio de Janeiro.

Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A. M., Gialanella, S. (2013), “*Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer*”, Energy and buildings, V.66, p.33-40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.004>

Albatici, R., Tonelli, A. M. (2010), “*Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*”, Energy and Buildings, V.42, No.11, p.2177-2183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>

Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, G. (2012), “*A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*”, Applied Energy, V.97, p.365-373. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054>

ASTM. (2013a). “*C1046-95: Standard practice for in-situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 10. <http://dx.doi.org/10.1520/C1046>

ASTM. (2013b). “*C1155-95: Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 8. <http://dx.doi.org/10.1520/C1155-95R13>

- ASTM. (2015a). “C1060-11a: Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 7. <http://dx.doi.org/10.1520/C1060-11AR15>
- ASTM. (2015b). “C1153-10: Standard practice for location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 6. <http://dx.doi.org/10.1520/C1153-10R15>
- Aversa, P., Palumbo, D., Donatelli, A., Tamborrino, R., Ancona, F., Galietti, U., Luprano, V. A. M. (2017), “Infrared thermography for the investigation of dynamic thermal behaviour of opaque building elements: Comparison between empty and filled with hemp fibres prototype walls”, *Energy and Buildings*, V.152, p.264-272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.055>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T. (2013), “Infrared thermography for condition monitoring – A review”, *Infrared Physics & Technology*, V.60, p.35-55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Barr, E. S. (1961), “The infrared pioneers—I. Sir William Herschel”. *Infrared Physics*, v. 1, p. 1-2.
- Bianchi, F., Pisello A. L., Baldinelli G., Asdrubali, F. (2014), “Infrared Thermography Assessment of Thermal Bridges in Building Envelope: Experimental Validation in a Test Room Setup”, *Sustainability*, V. 10, No. 6, p.7107-7120. <https://doi.org/10.3390/su6107107>
- Brás, A., Gonçalves, F., Faustino, P. (2014), “Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation”, *Energy and Buildings*, V.72, p.296–308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.022>
- Cani, B. F., Marinovski, D. L., Lamberts, R. (2012), “Aplicação da termografia infravermelha para verificação da temperatura em telhas cerâmicas com diferentes teores de umidade e condições de limpeza da superfície” in: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - XIV ENTAC, Juíz de Fora: MG (BR).
- Castro, J. L. B. B. (2010), “Quantificação dos coeficientes de transmissão térmica lineares - pontes térmicas”, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, p.314.
- Ciocia, C., Marinetti, S. (2012). “In-situ emissivity measurement of construction materials”, in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Napoly: Italy.
- Clark, M., McCann, D., Forde, M. (2003), “Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges”. *NDT&E International*, V.36, No. 4, pp. 265- 275.
- Danielski, I., Fröling, M. (2015). “Diagnosis of buildings’ thermal performance - a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow”, *Energy Procedia*, V.83, p.320-329. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.186>
- Datcu, S., Ibos, L., Candau, Y., Mattei, S. (2005), “Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography”, *Infrared Physics & Technology*, V. 46, p. 451-467. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.01.001>
- Decreto-Lei Nº 80/2006. (4 de Abril de 2006). Regulamento das características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- Diao, R., Sun, L., Yang, F. (2018), “Thermal performance of building wall materials in villages and towns in hot summer and cold winter zone in China”, *Applied Thermal Engineering*, V. 128, p. 517-530. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.159>
- Directive 2010/31/EU Of The European Parliament and of the Council. (2010). Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=IT>> Acessado em: 13 de Junho de 2018.
- Donatelli, A., Aversa, P., Luprano, V. A. M. (2016), “Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls”, *Infrared Physics & Technology*, V. 79, p. 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.10.005>

- EIA. U. S. Energy information administration. (2018). Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1>. Acessado em: 15 de Junho de 2018.
- EN. (1999), “13187: Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method”, (London, United Kingdom: British Standards Institution), p. 16. <https://doi.org/10.3403/01569434U>
- FLIR-Forward Looking Infrared. (2017). “*User’s manual FLIR Cx Series*” (Wilsonville, United States: FLIR), p. 67.
- Ghahramani, A., Castro, G., Karvigh, S. A., Becerik-Gerber, B. (2018), “*Towards unsupervised learning of thermal comfort using infrared thermography*”, Applied Energy, V. 211, p. 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.021>
- Green Building Council Brasil. (2015), “*O consumo de energia nas edificações do Brasil*”. Disponível em: <http://www.gbcbrazil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=119>. Acesso em: 03 de julho de 2018.
- Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S. (2002). “*Monitoring of ancient buildings by the thermal method*”, Journal of Cultural Heritage, V.3, p. 21–29. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01159-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01159-7)
- Grinzato, E., Vavilov, V., Kauppinen, T. (1998). “*Quantitative infrared thermography in buildings*”, *Energy and Buildings*, V.29, No.1, p. 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)
- ISO (2015), “*6781-3: Performance of buildings -- Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods -- Part 3: Qualifications of equipment operators, data analysts and report writers*”, (Geneva, Suíça: [International Organization for Standardization](http://www.iso.org)), p. 18.
- ISO (2008), “*13790: Energy performance of buildings -- Calculation of energy use for space heating and cooling*”, (Geneva, Suíça: [International Organization for Standardization](http://www.iso.org)), p. 167.
- Jorge, L. F. A. (2011). “*Determinação do coeficiente de transmissão térmica em paredes de edifícios*”, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Portugal, p. 112.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., Kalogirou, S. A. (2014). “*Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*”, Applied Energy, V.134, p.531-549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- Lai, W. W., Lee, K., Poon, C. (2015). “*Validation of size estimation of debonds in external wall’s composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm*”, Construction and Building Materials, V. 87, p. 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.032>
- Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R. M. S. F. (2018). “*A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration*”, Energy and Buildings, V. 168, p. 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.050>
- Lucchi, E. (2018). “*Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 82, parte 3, p. 3077-3090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
- Maldague, X. (2001). “*Infrared and Thermal testing: Nondestructive testing handbook*. 3th ed, Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.
- Marino, B. M., Muñoz, N., Thomas, L. P. (2016). “*Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography*”, *Applied Thermal Engineering*, V. 114, p. 1213-1221. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033>
- Marinoski, D. L., Souza, G. T., Sangoi, J. M., Lamberts, R. (2010). “*Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos*”, in: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Canela: Rio Grande do Sul (BR).
- Marques, T. H.T., Chavatal, K. M. S. (2013). “*A Review of the Brazilian NBR 15575 standard: applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance*”, in: Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, San Diego: Califórnia (EUA).

- Meola, C. (2012), *Infrared thermography: recent advances and future trends*. Bentham Books, Italy, p.24-26. eISBN: 978-1-60805-143-4.
- Milovanović, B., Pečur, I. B., Štirmer, N. (2016). “*The methodology for defect quantification in concrete using ir thermography*”, *Journal of civil engineering and management*, V. 23, p. 573-582. <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1210220>
- O’Grady, M, Lechowska, A. A., Harte, A. M. (2017b). “*Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging*”, *Energy and building*, V.135, p. 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>
- O’Grady, M., Lechowska, A.A., Harte, A. M. (2017a). “*Quantification of heat losses through building envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography Technique*”, *Applied Energy*, V.208, p. 1038-1052. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.047>
- Pei, C., Qiu, J., Liu, H., Chen, Z. (2016). “*Simulation of surface cracks measurement in first walls by laser spot array thermography*”, *Fusion Engineering and Desing*, V.109-111, parte B, p. 1237-1241. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.11.055>
- Porras-Amores, C, Mazzarrónb, F.R., Canas, I. (2013), “*Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature*”, *Energy and Building*, V.65, p.292-298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.022>
- Rajic, N. (2002), “*Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*”, *Composite Structures*, V. 58, p. 521-528. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00161-7)
- Robinson, A. J., Lesage, A. F. J., Reilly, A., Mcgranaghan, G., Byrne, G., O’hegarty, R., Kinnane, O. (2017), “*A New Transient Method for Determining Thermal Properties of Wall Sections*”, *Energy and Buildings*, V. 142, p. 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.029>
- Rocha, J. H. A., Póvoas, Y. V. (2017). “*A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte*”, *Revista ALCONPAT*, V. 7, nº 3. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Savastano Junior, H., Pimentel, L. L. (2000). “*Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção*”, [Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi](http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000100019), V. 4, n. 1, p. 103-110. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000100019>
- Silva, E. P., Cahino, J. E. M., Melo, A. B. (2012), “*Avaliação do desempenho térmico de blocos EVA*”, in: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juíz de Fora: Minas Gerais (BR).
- Simões, I., Simões, N, Tadeu, A., Riachos, J. (2014), “*Laboratory assessment of thermal transmittance of homogeneous building elements using infrared thermography*”, in: 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Bordeaux: France.
- Smith, R. A., Jones, F. E., Chasmar, R. P. (1958), *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*, Oxford University Press.
- Tanic, M., Stankovic, D., Nikolic, V., Nikolic, M., Kostic, D., Milojkovic, A., Spasic, S., Vatin, N. (2015). “*Reducing Energy Consumption by Optimizing Thermal Losses and Measures of Energy Recovery in Preschools*”, *Procedia Engineering*, v. 117, p. 919 – 932. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.179>
- Viégas, D. J. A. (2015). “*Utilização de termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimentos*”, *Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco*, Recife, p. 164.

Adesão, reforço e durabilidade na reabilitação de vigas de Concreto Armado (RC) usando Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão bibliográfica

P. J. Poot Cauich¹ , R. Martínez-Molina¹ , J. L. Gamboa Marrufo¹ , P. J. Herrera Franco^{1*} 

* Autor de Contato: pherrera@cicy.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

Recepção: 30/03/2019 | Aceitação: 22/04/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este artigo aborda a mecânica de aderência, o efeito de fortalecimento e a durabilidade de aplicações de CFRP em vigas de concreto armado. A aplicação de materiais CFRP tem sido descrita extensivamente na bibliografia, mas sempre com foco principal nas falhas do sistema. O primeiro problema é fortalecer as vigas de concreto armado com o CFRP. O segundo é evitar a perda de aderência local na interface CFRP com RC, ou seja, o escorregamento local τ . O último problema é a durabilidade do reforço de CFRP, quando exposto a um ambiente úmido e quente. O papel da adesão e a mecânica da aderência do concreto ao CFRP e uma boa compreensão da interface entre o CFRP e o comportamento do concreto é o fator chave no controle de falhas de aderência em vigas de concreto armado (RC) reforçadas com CFRP.

Palavras-chave: compósitos de fibra de carbono; interface resina-concreto; interface de matriz de fibra; adesão.

Citar como: Poot Cauich, P. J., Martínez-Molina, R., Gamboa Marrufo, J. L., Herrera Franco, P. J. (2019), "Adesão, reforço e durabilidade na reabilitação de vigas de Concreto Armado (RC) usando Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão bibliográfica", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 130 – 150, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

¹ Universidad Marista, Mérida, Yucatán, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review

ABSTRACT

This paper addresses the mechanics of adhesion, strengthening effect and durability issues of applications of CFRP composite materials in beams. The application of CFRP materials has been widely described, but the main focus has been on overall failure parameters. The first issue is strengthening capability of CFRP reinforcement for concrete beams. The second is the local interface bond stress-slip relationship, that is, the local τ -slip. The last issue is the durability of the CFRP sheet/plate, when exposed to a hydro-thermal environment. The role of adhesion and the mechanics of concrete-CFRP adhesion and a sound understanding of the interface between the CFRP and concrete behavior is the key factor for controlling debonding failures in CFRP-strengthened RC beams.

Keywords: carbon fiber composites; resin-concrete interphase; fiber-matrix interphase; retrofitting; adhesion.

Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) - Una revisión

RESUMEN

Este documento aborda la mecánica de la adhesión, el efecto de reforzamiento y la durabilidad de las aplicaciones de materiales compuestos de CFRP en vigas. La aplicación de los materiales de CFRP se ha descrito ampliamente, pero el enfoque principal se ha centrado en los parámetros generales de falla. El primer problema es el fortalecimiento de la capacidad del refuerzo de CFRP para vigas de concreto. El segundo es la relación local tensión-deslizamiento del enlace de la interfaz, es decir, el deslizamiento τ local. El último problema es la durabilidad de la hoja/placa de CFRP, cuando se expone a un ambiente hidro-térmico. El papel de la adhesión y la mecánica de la adhesión de concreto-CFRP y una buena comprensión de la interfaz entre el CFRP y el comportamiento del concreto es el factor clave para controlar las fallas de desunión en vigas de CR reforzadas con CFRP.

Palabras clave: compuestos de fibra de carbono; interfase resina-hormigón; interfase de matriz de fibra; reequipamiento, adhesión.

NOMENCLATURA

a – Extensão de cisalhamento	β_1 – Coeficiente que determina a compatibilidade da curva representativa de compressão do concreto a um retângulo de acordo com as recomendações da ACI 440-2R (2008)
b_f – Largura da camada de CFRP	ϵ_{bi} – Deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço
b_w – Largura da viga	ϵ_c – Deformação do concreto
b_p – Largura da placa CFRP colada	ϵ_{cu} – Deformação última do concreto
b_c – Largura do concreto no ensaio pull-out	
L_b – Comprimento de CFRP aderido	
L_e – Comprimento efetivo do CFRP	
T_p – Espessura da placa CFRP colada	
c – Altura do bloco de compressão retangular equivalente do concreto	

c_1 – Fator obtido pela calibração dos resultados (igual a 0,64 para o CFRP)	ε_f – Deformação da fibra de carbono
d – Altura efetiva da viga	ε_{fd} – t Valor limite da deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação da armadura
d' – Posição do centro de gravidade da armadura comprimida	ε_{fe} – Deformação efetiva no FRP
f_c – Resistência à compressão de concreto	ε_{fu} – Deformação última observada no polímero no momento da falha
f_{ctm} – Resistência à tração média do concreto	ε_s – Deformação na armadura de tração
f_{fe} – Resistência efetiva do CFRP	ε_s' – Deformação na armadura comprimida
f_s – Resistência do aço	ε_{ys} – Deformação de escoamento da armadura de flexão
A_f – Área de aço aplicada à viga	G_f – Energia de fratura interfacial
A_s – Área de aço da armadura de tração	s – Deslizamento local;
A_s' – Área de aço da armadura comprimida	s_e – Componente elástico do deslizamento local;
E_f – Módulo de elasticidade do CFRP	s_f – Deslizamento local quando a tensão de aderência τ reduz para zero;
E_s – Módulo de elasticidade do aço	s_0 – Deslizamento local em τ_{max} ;
F_{cc} – Compressão resultante	B_l – Fator de comprimento de aderência;
L – Comprimento total da viga	B_w – Fator de relação de largura;
P – Carga aplicada no ensaio experimental	τ – Tensão de aderência local;
T_s – Componente de tração devido à armadura de tração	τ_{max} – Tensão de aderência local máxima;
α – Coeficiente de redução devido à propagação de fissuras inclinadas	τ_u – Tensão de aderência média.

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas quatro décadas, o desenvolvimento de materiais do ponto de vista teórico e tecnológico de materiais compósitos avançados resultou em seu uso generalizado. Suas excelentes propriedades de engenharia, como alta resistência específica e rigidez, baixa densidade, alta resistência à fadiga, alto amortecimento e baixo coeficiente térmico (na direção da fibra), etc., resultaram em um uso constante nas indústrias aeroespacial, marítima e automotiva.

Estruturas de concreto armado podem ser danificadas após alguns anos de serviço ou exposição à ambientes agressivos, como ambientes marítimos e/ou industriais e, portanto, precisam de reparos. Então, para permitir uma capacidade de carga maior do que o valor de projeto original, os elementos estruturais precisam ser adaptados. A corrosão é uma das principais causas de deterioração da infraestrutura civil, especialmente pontes, com consequências que vão desde o enfraquecimento progressivo dos elementos estruturais devido a fissuras e perda de seção transversal, até o colapso repentino. Os altos índices de resistência/peso e rigidez/peso dos compósitos os tornam atraentes para uso em reabilitação de infraestrutura. Uma técnica comum de reparo / adaptação para vigas de concreto é unir uma placa ao fundo da viga. Inicialmente, chapas de aço foram empregadas e, mais recentemente, a atenção tem sido direcionada ao uso de placas de compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP), que oferecem maior resistência/peso e vários atributos atrativos já mencionados além de uma durabilidade melhorada. Além disso, estes compósitos avançados estão sendo considerados como um substituto para o aço convencional em estruturas de concreto armado devido à contínua diminuição do custo dos materiais CFRP e ao desenvolvimento de adesivos sintéticos baseados em resinas epóxi, (CKY Leung, (2001), Swamy RN et al., (1987), Hamoush S.A. (1990), Norris, (1997), Karbhari et al., (1995), Saadatmanesh, (1995)).

O desempenho do CFRP como agente de reforço para elementos de concreto tem sido estudado, desde a sua estrutura, material e método de aplicação. A resistência à flexão de vigas RC usando compósitos pode ser fornecida por colagem de epóxi da placa CFRP à porção dos elementos submetidos a tensões de tração, com fibras paralelas à direção de tensão principal. Se as fibras do material compósito forem colocadas perpendicularmente às fissuras, um grande aumento na resistência e rigidez é alcançado em comparação com a situação em que as fibras são colocadas obliquamente às fissuras. Além disso, o aumento de resistência para vigas RC de aproximadamente 200% é obtido com compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP). O desempenho de flexão de vigas RC reforçados é afetado por vários fatores como módulo de elasticidade do CFRP e sua localização no centro de gravidade em relação à linha neutra, largura do laminado, comprimento do laminado, quantidade de armadura principal e cisalhamento, número de camadas de CFRP, nível de carregamento, configuração da laminação, resistência e cobertura do concreto, danos e condições de carregamento, etc. (Sandeep S. et al, 2008).

A aderência do CFRP ao substrato de concreto é de fundamental importância para a eficácia do mecanismo de reforço, pois significa a transferência de tensões entre o concreto e o CFRP, a fim de desenvolver uma ação composta. Vários relatos podem ser encontrados na literatura técnica estudando diferentes aspectos que afetam a eficiência do reforço de CFRP.

O principal objetivo deste trabalho é revisar a literatura (analítica / experimental) dos diferentes parâmetros que afetam os mecanismos de transferência de carga do elemento RC para o CFRP e discutir os efeitos de vários parâmetros que afetam a durabilidade, especialmente parâmetros relacionados com a interface adesivo-concreto, bem como o desempenho do laminado de material compósito quando expostos a ambientes úmidos e temperaturas altas. A discussão é mantida em um nível descritivo e o leitor é aconselhado a se referir às referências citadas para detalhes de parâmetros e modelos matemáticos.

Parâmetros como resistência à compressão do concreto na resistência de aderência e transferência de resistência das placas compostas para o concreto foram estudados por Chajes, M.J. et al, (1996). Eles observaram dois mecanismos de falha que direcionam a cortante do concreto e ocasionam falhas de aderência, dependendo do tipo de adesivo e do concreto. Eles também mostraram que a preparação da superfície do concreto pode influenciar muito a resistência de aderência. Estudos similares foram conduzidos por Yoshizawa et al, (1996) que relataram que a rugosidade da face do concreto teve um efeito determinante na capacidade de carga da amostra. Além disso, quando o modo de falha da junta era governado pelo cisalhamento do concreto, a resistência de aderência final era proporcional à raiz quadrada da resistência do concreto f'_c . Eles também descobriram que existe um comprimento efetivo de aderência para uma junta, além do qual nenhum aumento adicional na carga de falha pode ser alcançado.

2. A MECÂNICA DA ADESÃO CONCRETO-CFRP

2.1 Análise linear da adesão de concreto-CFRP colada

A desconexão entre o concreto e as lâminas / chapas de CFRP em casos de reforço de flexão e cisalhamento diminui a eficiência de resistência dos materiais de CFRP ou causa uma deficiência na ductilidade do elemento (Dai, et al, 2005). A resistência de aderência à interface ou propriedade de deslizamento de tensão local tem mostrado influenciar o pico de flexão ou resistência ao cisalhamento de elementos RC adaptados usando CFRP por meio de modelos analíticos (Buyukozturk e Hearing 1998, fib 2001) dando origem a várias resistências de adesão, comprimento de ancoragem e modelos locais de deslizamento de aderência (Chen e Teng, 2001). Como afirmado por Lu et al. (2005), um modelo de deslizamento de aderência preciso é de fundamental importância na modelagem da estrutura RC fortalecida por CFRP. Uma boa compreensão do comportamento da interface entre o CFRP e o concreto é o principal fator que

controla as falhas de descolagem em estruturas RC reforçadas por CFRP. Portanto, para o projeto seguro e econômico de sistemas CFRP aderidos externamente, neste artigo é feita referência à análise apresentada por De Lorenzis, L. 2001, e mencionados outros modelos disponíveis na literatura técnica (ver Fig. 1), (Tajlsten B. 1997, Bizindavvi L. 1999, Mander JB 1998, Jeffries, JM 2001).

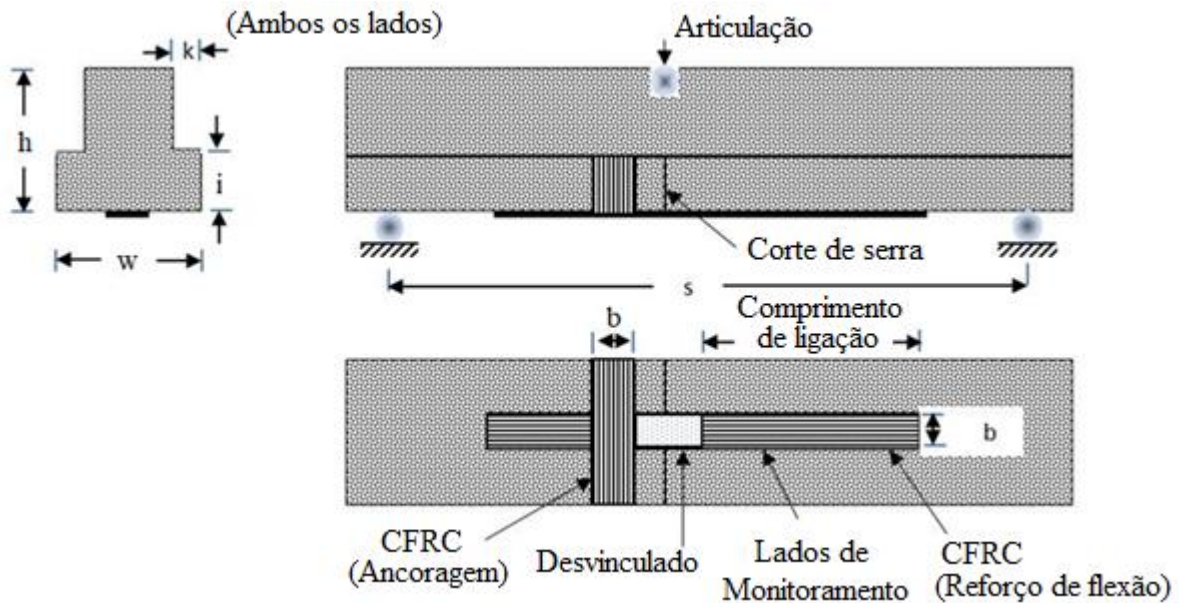


Figura 1. Amostra de ensaio mostrando as dimensões da viga de concreto e a posição e dimensões do reforço de CFRP, bem como a ancoragem do CFRP. (De Lorenzis, L. 2001)

Considerando o equilíbrio estático e relações de compatibilidade de um elemento diferencial da lâmina de comprimento dx , e assumindo um comportamento elástico linear da lâmina de CFRP e que a rigidez do concreto é muito maior que a rigidez do compósito, isto é, tensão desprezível no concreto e que o adesivo é submetido apenas a resistências de cisalhamento, a seguinte equação diferencial resulta. Em níveis de carga moderados, um comportamento de escorregamento de aderência linear pode ser adotado:

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{1}{tE} \tau[s(x)] = 0 \quad (1)$$

Onde s é o escorregamento, τ é a tensão de aderência, x a coordenada ao longo do comprimento aderido do laminado, t a espessura e E o módulo de elasticidade do CFRP. Em níveis de carga moderados, pode ser adotado um comportamento linear de escorregamento de aderência. Uma solução da equação 1, neste caso, seria:

$$s(x) = C_1 \text{Sinh } \alpha x + C_2 \text{Cosh } \alpha x \quad (2a)$$

$$\varepsilon(x) = \alpha C_1 \text{Cosh } \alpha x + \alpha C_2 \text{Sinh } \alpha x \quad (2b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (2c)$$

Onde:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{tE}} \quad (3)$$

As constantes C_1 e C_2 podem ser determinadas a partir das condições de contorno. Se a origem da coordenada x corresponde à extremidade livre da lâmina ($x = 0$), onde não existe deformação, e $x = l$ (sendo o comprimento aderido) corresponde ao final da lâmina CFRP onde a carga externa é aplicada diretamente, as condições de contorno são:

$$\varepsilon(0) = 0 \quad (4a)$$

$$\varepsilon(l) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (4b)$$

E as equações 2a-c se tornam

$$s(x) = \left(\frac{\sigma_0}{\alpha E} \right) \frac{\text{Cosh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5a)$$

$$\varepsilon(x) = \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \frac{\text{Sinh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (5c)$$

O módulo de deslizamento K pode ser estimado usando um modelo de cisalhamento simples como a razão entre o módulo de cisalhamento do adesivo e a espessura da camada adesiva. Além disso, quando CFRP baseado em lâminas em vez de placas é usado, o módulo de deslizamento $K = G_{\text{int}}/t_{\text{int}}$ ou seja, a relação entre o módulo de cisalhamento do CFRP, G_{int} e a espessura da interface t_{int} onde G_{int} é o módulo de cisalhamento da interface lâmina-concreto CFRP e t_{int} é espessura da interface, pode ser avaliada da seguinte forma: quando o material compósito é formado in loco, utilizando a técnica adequada, o sistema de resina serve intrinsecamente tanto como matriz para o compósito como interface entre o concreto e o compósito, ou seja, como a camada adesiva. Esta camada é então o meio principal para a transferência de tensões de cisalhamento entre o compósito e o concreto. Para a estimativa de G_{int} , a camada de primer também deve ser considerada. Portanto, G_{int} e t_{int} podem ser calculados a partir das espessuras obtidas a partir da microscopia eletrônica de varredura e as propriedades elásticas da resina e do primer, utilizado para o cálculo do módulo de cisalhamento:

$$G_{\text{int}} = \frac{G_{\text{resin}} G_{\text{primer}}}{t_{\text{resin}} G_{\text{primer}} + t_{\text{primer}} G_{\text{resin}}} \quad (6)$$

Onde:

$$G_{\text{resin}} = \frac{E_{\text{resin}}}{2(1+\nu_{\text{resin}})} \quad (7)$$

A equação 7 também pode ser usada para estimar o módulo de cisalhamento do primer. As curvas τ -slip locais podem ser obtidas a partir de dados experimentais como segue. A tensão de aderência, τ , pode ser encontrada pelo equilíbrio de resistências, considerando também a elasticidade linear do CFRP.

$$\tau(x) = tE \frac{d\varepsilon_r(x)}{dx} \quad (8)$$

Onde ε_r é a tensão CFRP até a falha, portanto, o diagrama $\tau(x)$ pode ser obtido a partir da primeira derivada do diagrama de tensão vs. localização multiplicado pelo módulo elástico E e a espessura.

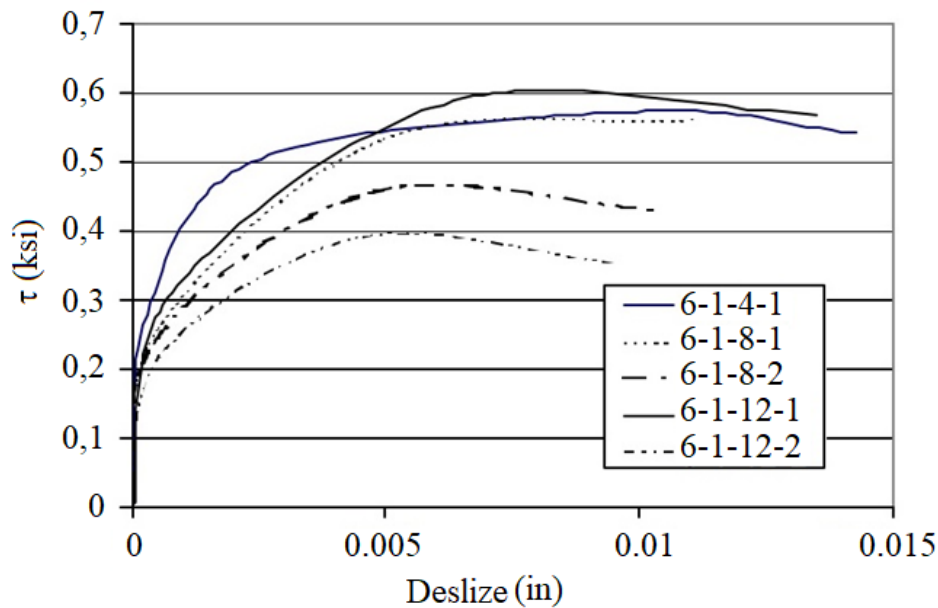


Figura 2. Relações τ -slip locais para amostras com diferentes comprimentos de aderência CFRP (4, 8 e 12 in) coladas no lado de tração de uma viga de concreto. Nota: 1 em = 25,4 mm; 1 psi = 7,03 kPa (De Lorenzis et al, 2001).

A Figura 2 ilustra algumas curvas de tensão τ -slip obtidas de amostras ensaiadas em um nível de carga correspondente a um descolamento iminente. Isso foi identificado como o nível de carga no qual a distribuição de deformação se torna linear. As curvas típicas τ -slip devem consistir em um ramo ascendente com degradação contínua da rigidez até a tensão máxima de adesão e um ramo descendente curvo atingindo uma tensão de aderência zero em um valor finito de deslizamento. Embora um modelo preciso de adesão e deslizamento deva consistir em um ramo ascendente curvo e um ramo descendente curvo, outras formas, como um modelo bilinear, podem ser usadas como uma boa aproximação. Um modelo preciso de adesão e deslizamento deve fornecer previsões aproximadas tanto da forma quanto da energia da fratura (área sob a curva de adesão e deslizamento) da curva de adesão e deslizamento. Nenhum dos modelos de deslizamento de ligações existentes fornece previsões precisas tanto da forma quanto da energia da fratura interfacial como encontradas nos ensaios. A área abaixo da curva de deslizamento, indicada como G_f , é a energia de fratura por unidade de área da junta colada (Lu X.Z. 2005).

Em um artigo recente, Hamze-Ziabari e Yasalovi, (2017), fizeram um resumo das equações existentes para a previsão da transferência de carga entre o concreto e o comprimento efetivo de transferência de carga do CFRP. Essas equações foram derivadas de considerações teóricas da mecânica da fratura ou de equações empíricas calibradas com conjuntos de dados experimentais

ou combinações dos dois. No entanto, a precisão desses modelos parecia ser limitada. Por uma questão de perfeccionismo, algumas dessas equações também são reproduzidas nesta revisão (ver tabela 1):

Table 1. Tabela 1. Equações para estimar a carga máxima transferível P_{max} , bem como o comprimento efetivo do CFRP.

Referência	Equação de carga máxima transferível P_{max}	Comprimento efetivo e considerações
Chen, F.J., Teng, G.J. (2001)	$P_{max} = 0.315\beta_p\beta_L b_p L_e \sqrt{f_c}$	$L_e \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}}$ $\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b}}{1 + \frac{b_p}{b}}}$ $\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{if } L_b \geq L_e \\ \text{Sin } \frac{\pi L_b}{2L_e} & \text{if } L_b \leq L_e \end{cases}$
De Lorenzis et al (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{2E_f t_p G_f}$	G_f é a energia de fratura por unidade de área da junta, assumida como sendo igual a 1,06 N-mm / mm ²
Teck-Yong et al (1987)	$P_{max} = \left(0.5 + 0.08\sqrt{\frac{E_f t_p}{1000}}\right) \frac{b L_e f_c}{2}$	
Van Gemert (1980)	$P_{max} = \frac{b_p L f_c}{2}$	
Tanaka (1996)	$P_{max} = (6.13 - \text{Ln}(L_b)) b_p L_b$	
Maeda et al (1997)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_f t_p b_p L_e$	$L_e = e^{6.15 - 0.58 \text{Ln}(E_f t_p)}$
Yuan, Wu and Yoshizawa, (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{\frac{2G_f}{\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c}}}$	
Neubauer and Rostasy (1997)	$P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \text{ if } L_b \geq L_e$ $P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e}\right) \text{ if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - \frac{b_p}{b_e}}{1 + \frac{b_p}{400}}}$
Khalifa et al (1998)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_p t_p b_p L_e \left(\frac{f_c}{42}\right)^{2/3}$	$L_e = e^{6.13 - 0.58 \text{Ln} E_p t_p}$
Adhikary and Mutsuyoshi (2001)	$P_{max} = b_p L_b (0.25 f_c)$	
Dai et al (2006)	$P_{max} = (b_p + 7.4) \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$G_f = 0.514 f_c^{0.236}$

Lu et al 2005	$P_{\max} = b_p B_1 \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$L_e = a + \frac{1}{2\lambda_1} \operatorname{Ln} \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)} \right)$ $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{s_0 E_p t_p}} \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{(s_f - s_0) E_p t_p}}$ $a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left[0.99 \sqrt{\frac{s_f - s_0}{s_f}} \right]$ $\tau_{\max} = \alpha_1 B_w f_t \quad \alpha_1 = 0.15$ $G_f = 0.308 B_w^2 \sqrt{f_t}$ $s_0 = 0.0195 B_w f_t$ $B_w = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{b_p}{b}}{1.25 + \frac{b_p}{b}}}$ $B_1 = \sin \left[\frac{\pi L_b}{2L_e} \right]$
Camli e Binici (2007)	$P_{\max} = \sqrt{\tau_f \sigma_f} \sqrt{E_f t_p b_p} \tanh \left(\frac{\theta L_b}{L_e} \right)$	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}} \quad \theta = \sqrt{\frac{\tau_f}{\sigma_u f_c^{1/2}}}$ $\tau_f = 3.5 f_c^{0.19}$ $\sigma_u = f_c^\alpha \left(\frac{L_b}{L_e} \right)^\beta \left(\frac{b_b}{b} \right)^\gamma$ $\alpha = -0.4 \quad \beta = 0.8 \quad \gamma = 0.4$
fib model code (2001)	$P_{\max} = 0.64 k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \quad \text{if } L_b \geq L_e$ $P_{\max} = 0.64 \alpha k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \left(\frac{L_b}{L_e} \right) \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) \quad \text{if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{\frac{1.125 \left(2 - \frac{b_p}{b_e} \right)}{1 + \frac{b_p}{400}}}$ $\alpha = 1 \quad k_c = 1$
CNR-DT200/2004 2004	$P_{\max} = b_p \sqrt{2E_p t_p K_G K_p K_1 (f_i f_c')^{1/2}}$	$K_G = 0.03$

		$K_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } L \geq L_e \\ \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) & \text{if } L \leq L_e \end{cases}$ $L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2 f_t}}$ $K_b = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 - 0.33}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \leq 0.33 \\ \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \geq 0.33 \end{cases}$
--	--	--

2.2 Reforço de vigas com CFRP

Os modos de falha observados das vigas de concreto reforçadas com placas CFRP foram relatados por Teng et al (2003) e posteriormente analisados por Ferreira et al (2018). Eles relataram três modos típicos de falha: (1) falha de tração do CFRP quando sua resistência à tração é menor que a carga aplicada; (2) descolagem do reforço na interface laminado-concreto; e (3) falha coesiva do concreto e separação do reforço em conjunto com uma camada de concreto.

O primeiro modo de falha é atribuído a um modo frágil de falha, mas é evidente que a resistência de aderência de CFRP-concreto é maior. O segundo modo de falha é atribuído à falta de ancoragem do reforço, fissura excessiva da viga ou falhas na colagem. Novamente aqui, a falha da resistência adesiva pode ser causada por tensões normais no final da tira de CFRP, onde se sabe que existe uma singularidade de tensão [Leung, 2001, A.R. Khan et al 2014 e R.A. Hawileh et al 2015].

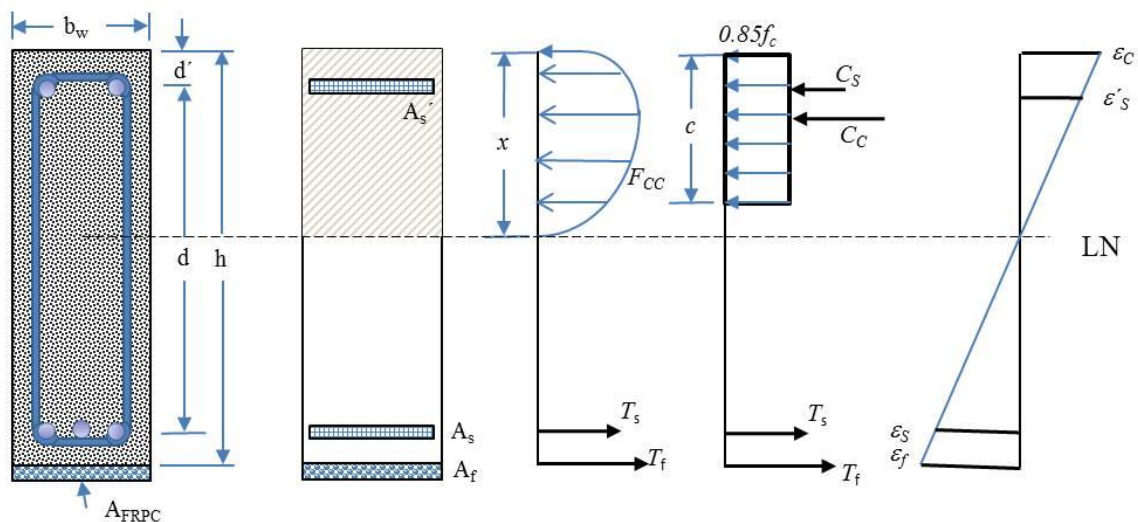


Figura 3. Diagrama de tensão-deformação de uma viga de concreto armado reforçada com CFRP (Ferreira et al, 2018)

A análise do reforço de uma viga de concreto com uma camada de CFRP carregada em flexão apresentada por Ferreira et al (2018) considerou que a relação da estrutura de viga reforçada é equivalente à adição na relação de armadura inicial com a contribuição da armadura (veja a figura 3).

$$\rho_r = \rho + \frac{A_f E_f}{b_w h E_s} \quad (10)$$

Onde ρ é a relação entre a armadura da viga antes do reforço, A_f é a área de reforço aplicada na viga, E_f é o módulo de elasticidade do CFRP, E_s é o módulo de elasticidade do aço, b_w e h são a largura e altura da viga, respectivamente. As recomendações para o dimensionamento do reforço com CFRP de acordo com o código americano ACI 440-2R são as seguintes: O valor limite da deformação da fibra a ser adotada no dimensionamento e verificação da armadura é expresso em termos do módulo de elasticidade do CFRP, e ε_{fu} a tensão final observada no polímero no momento da falha e n , o número de camadas de CFRP.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{n E_f t_f}} < 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (11)$$

A deformação efetiva no elemento composto CFRP é expressa em função da deformação final do concreto ε_{cu} e da deformação no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço, ε_{bi} e x , a posição da linha neutra.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (12)$$

f_{fe} é a resistência efetiva do CFRP;

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (13)$$

ε_s' é a deformação na armadura comprimida e d' é a posição do centróide da armadura comprimida.

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(\frac{x-d'}{x} \right) \quad (14)$$

A deformação na armadura de tração, ε_s , é expressa por:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \left(\frac{d-x}{h-x} \right) \quad (15)$$

f_s' , a resistência no aço da armadura comprimida é dada em função da deformação na armadura comprimida ε_s' e do módulo de elasticidade no aço;

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' \leq f_{ys}' \quad (16)$$

A resistência no aço da armadura de tração é dada por

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{ys} \quad (17)$$

A posição da linha neutra é calculada da seguinte forma:

$$x = \frac{(A_s f_s) + (A_f f_{fe}) - (A_s' f_s')}{\beta_1 (0.85 f_c) b_w} \quad (18)$$

A_s é a área de aço da armadura de tração; A_s' é a área de aço da armadura comprimida; β_1 é um coeficiente que determina a aproximação da curva de compressão resultante do concreto a um retângulo, sendo 0,85 para concreto com valores de f_c menores que 28 MPa, que diminui linearmente em 0,05 para cada 7 MPa acima desse limite de resistência à tração. O valor mínimo para esse coeficiente, segundo a ACI 318 (2014), é de 0,65.

As condições na interface entre o compósito e o concreto requerem um entendimento completo do ponto de vista da mecânica. Diferentes formulações de resina epóxi ou qualquer outro adesivo usado resultará em um comportamento completamente diferente da junta do composto de concreto. Além disso, o desenho geométrico do laminado e das ancoragens também influenciarão o comportamento mecânico e, conseqüentemente, a eficácia do reforço. Então, como primeiro passo, sempre que possível, e dependendo da disponibilidade do equipamento de ensaio, estudos preliminares dos parâmetros de adesão entre o compósito e o concreto são necessários para determinar os comprimentos das juntas para uma transferência efetiva de tensão necessária para atingir a capacidade de resistência do compósito.

3. EFEITOS AMBIENTAIS NA INTERFACE CFRP-CONCRETO

A interface concreto-CFRP foi reconhecida como a região onde ocorre a eficiência da transferência de carga do elemento estrutural para o laminado CFRP. Como afirmam Swamy RN et al., (1987), as propriedades do adesivo epóxi são de suma importância, pois variaram consideravelmente com a espessura do corpo de prova e a taxa de carga. Da mesma forma, a interface de matriz de fibra é considerada como uma região importante do desempenho do laminado composto.

Este comportamento matricial no concreto-CFRP é de particular interesse em materiais compósitos avançados, uma vez que seu uso em aplicações estruturais com exposição ao meio ambiente requer que o material atenda a padrões muito rigorosos de desempenho, durabilidade e segurança. O transporte de umidade em sistemas poliméricos está relacionado com a disponibilidade de "espaço livre" ou "volume livre" de tamanho molecular na estrutura do polímero, bem como sua afinidade com a água. [M. R. Vanlandingham, et al (1999)]. Essa disponibilidade de "espaços livres" depende da microestrutura, morfologia e densidade de reticulações, que são funções do grau de cura, estequiometria, rigidez das cadeias moleculares e densidade de energia coesiva do polímero. A afinidade polímero-água está relacionada à presença de campos de aderência de hidrogênio ao longo das cadeias poliméricas que criam locais de resistências atrativas entre as moléculas de água e as do polímero. Moléculas de água que estão livres para se mover através de vazios ou volume livre são conhecidas como moléculas adsorvidas. No caso dos epóxios, sabe-se também que eles têm um volume livre significativo, particularmente a temperaturas entre 50 e 150 ° C abaixo da Tg. A afinidade epoxi-água é relativamente forte porque os grupos hidroxilares (-OH) são criados pela abertura do grupo epóxi por reação com aminas primárias e secundárias. [M. J. Adamson, 1736]. Então, no caso destes compósitos baseados em fibras de carbono e matriz epóxi, aquelas propriedades que são dominadas pela matriz ou interface fibra-matriz são degradadas pela absorção de umidade enquanto aquelas dominadas por fibras não são essencialmente afetadas. Em particular, a resistência ao cisalhamento interfacial, a resistência ao cisalhamento interlaminar, e dependendo da sequência de empilhamento das lâminas de resina de fibra de carbono-epóxi no laminado, os efeitos de borda também se tornam pontos de possível iniciação de falha, bem como a tenacidade à fratura do modo II e interlaminar dureza. Esta degradação é atribuída ao enfraquecimento da

interfase fibra-matriz e ao inchamento da matriz e plastificação da matriz [J. I. Cauich-Cupul, et al (2011), E. Pérez-Pacheco, et al (2011), S. Wang et al, (2002), L.E. Asp, (1998), M. Todo, et al, (2000), R. Selzer et al (1995), MJ Adamson, (1980), DA Bond, (2005), MR Vanlandingham, et al (1999)]. . A absorção de umidade também pode causar uma diminuição das tensões residuais produzidas a partir dos gradientes térmicos de cura e, portanto, resultando em uma diminuição das propriedades da fratura. Os efeitos da umidade são consideravelmente agravados pela temperatura e mais complicados pela ação de tensões mecânicas impostas ao material [J. B. Aguiar, et al (2008)].

Além disso, esses materiais compósitos são expostos a diferentes condições ambientais durante sua vida útil, como umidade, temperatura e radiação ultravioleta e, portanto, à possibilidade de efeitos sinérgicos nos mecanismos de degradação. Portanto, há sempre uma preocupação com a durabilidade a longo prazo desses materiais a serem expostos a condições ambientais combinadas de umidade, temperatura e radiação ultravioleta. [Springer, G.S. (ed.) (1984), Ranby, B. e Rabek J. F., (1975)]. Tanto a radiação ultravioleta como a umidade têm efeitos negativos principalmente nas propriedades mecânicas da resina epóxi e da interface fibra-matriz, afetando a integridade do composto [W. B. Liao, et al, 1998].

O tema da durabilidade dos sistemas de reforço de CFRP como um todo tem sido uma grande preocupação em aplicações de reabilitação estrutural. Comportamento de vigas reforçadas com CFRP submetidas a ciclos de congelamento-descongelamento, úmido-seco e temperatura ou várias soluções aquosas antes do carregamento foram estudadas por um número limitado de pesquisadores (Bank, et al, 1995, Gheorghiu C. et al, 2004, Grace NF e outros 2005, Wang C. Y, e outros, 2004, Xie M., 1995, Katz A., 1999). Houve uma mudança fundamental na abordagem do assunto. Ao contrário de submeter um material compósito específico a uma exposição ambiental por um período de tempo específico e depois realizar ensaios mecânicos para obter “dados” para uso do projeto, a abordagem mais recente tem sido tentar desenvolver um conjunto químico e mecânico integrado de ensaios que fornecem uma compreensão dos mecanismos de degradação dentro do material compósito. Estes trabalhos combinam métodos de ensaios macromecânicos com investigações de mudanças na composição do material, juntamente com uma microscopia eletrônica de varredura para desenvolver modelos que tentam explicar a mudança de propriedades mecânicas em termos de mudanças quantitativas na natureza química dos materiais e observação qualitativa da degradação. fenômeno (Bank and Gentry, 1995).

Buyukozturk O, 1998 e Grace e Singh, 2005, e concluíram que a exposição a longo prazo à umidade é o fator mais prejudicial para a resistência de adesão entre chapas e tecidos CFRP e vigas RC. Vigas reforçadas com placas CFRP e expostas a 10.000 h de umidade de 100% (a 38 ± 2 °C) apresentaram uma redução média de 33% em sua resistência. O início da delaminação foi o principal modo de falha para todas as vigas de ensaio.

A durabilidade de fibras de carbono reforçada com polímeros (CFRP) em estacas pré-tracionadas conduzidas em águas de maré e um estudo experimental para avaliar o provável efeito da mudança de temperatura diurna / sazonal em doze vigas pré-fissuradas CFRP projetadas para falhar por ruptura das hastes de protensão foram mantidas ao ar livre em dois tanques de água salgada e submetidas simultaneamente a ciclos úmidos/secos (simulação de marés) e ciclos quentes/frios (simulando variação de temperatura), (Aiello, et al, 2001). A durabilidade foi avaliada a partir de ensaios de flexão realizados periodicamente ao longo do período de exposição de quase 3 anos. Os resultados dos ensaios indicaram que a durabilidade não foi afetada, embora tanto a degradação da aderência quanto as reduções na capacidade final tenham sido observadas em algumas das amostras expostas. A degradação parecia estar ligada à extensão do dano de pré-fissuração sofrido antes da exposição. Isso sugere que quando se utiliza CFRP em estacas pré-tracionadas, as tensões devem ser cuidadosamente monitoradas para minimizar os danos.

Devido à mudança de comportamento sob condições ambientais variáveis, pode-se dizer que uma compreensão completa dos efeitos desses materiais sobre o desempenho dos sistemas de retrofit

não foi alcançada. Em particular, vários mecanismos de falha que a viga de concreto reformado pode manifestar, incluindo os mecanismos de descolagem e delaminação do CFRP da viga de concreto, não são bem conhecidos. Mais estudos são necessários para desenvolver uma melhor compreensão da capacidade de cisalhamento das seções de retrofit, os efeitos nas regiões de ancoragem do laminado CFRP, e os mecanismos de falha de descolamento e delaminação. Os tópicos do estudo futuro também devem incluir os efeitos das compatibilidades materiais e suas resistências à degradação através de ciclos ambientais e de carga, e a avaliação da integridade do sistema adotado através do uso de avaliação não destrutiva [Nakaba 2001].

Estritamente falando, a aplicação de uma camada de laminado compósito reforçado com fibra no lado de tração da viga, seja colando um laminado ou formando um material compósito in situ, usando a resina epóxi e fibras orientadas unidirecionalmente em um têxtil, um procedimento usual e manual, resultará em duas interfaces, a interface concreto-resina e a interface fibra-matriz, como mostrado na figura 4. Ambas as fases são suscetíveis de serem afetadas pela exposição ao meio ambiente. No entanto, na literatura técnica sobre o assunto do reforço de vigas com CRFP, há apenas referência à interface concreto-laminado.

Karbhari e Engineer, 1996, investigaram a degradação da interface composto-concreto após a exposição a condições ambientais que incluem umidade, água do mar, congelamento e descongelamento. Nesta investigação, o desempenho das vigas laminadas foi considerado a partir de aspectos relacionados a materiais e durabilidade. O efeito de cinco condições ambientais diferentes foi estudado e eles mostraram que a seleção do sistema de resina apropriado é crítica para o sucesso e apontou os perigos da seleção de sistemas com baixas temperaturas de transição vítrea e quedas drásticas no módulo instantâneo em função da temperatura. Os resultados indicaram que a degradação ocorre principalmente ao nível da resina em contato com o concreto, e que o devido cuidado deve ser tomado pelas mudanças na rigidez do compósito devido à exposição à umidade e à consequente plastificação da resina, assim como pela rigidez aumentar sob condições frias. (Aiello, et al., 2001, Plevris N, 1999, Soudki KA 2000, Wang CY 2004).

J.I. Cauich-Cupul et al, (2011) estudaram o efeito da absorção de umidade na interface em compósitos epóxi-simples IM7-fibra de carbono e mostraram um efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas da matriz, e essa deterioração foi atribuída a uma diminuição de sua temperatura de transição vítrea. Três níveis da interface fibra-epóxi de carbono IM7 foram estudados. O primeiro foi a fibra de carbono IM7 com o dimensionamento removido, então, o nível de adesão da matriz-fibra foi aumentado usando um agente de adesão de silano para tratar a superfície da fibra IM7 e terceiro, as fibras IM7 foram tratadas com ácido nítrico para produzir mais locais de reação química com o agente de adesão de silano.

A qualidade da interface fibra-matriz foi avaliada usando o ensaio de fragmentação de fibra única e o comprimento do fragmento de fibra, considerado como um indicador de qualidade interfacial que indicou um efeito contínuo de deterioração da absorção de umidade. Isto é, um comprimento curto de fragmento de fibra indicou uma forte interface de matriz de fibra e uma interface de matriz de fibra fraca (ou deteriorada) foi indicada por um longo comprimento de fragmento de fibra (ver figura 5). Além disso, o papel do inchamento da matriz por causa da absorção de umidade nas tensões residuais é considerado importante quando se considera a deterioração das propriedades de cisalhamento interfacial. A contribuição das tensões radiais diminuiu rapidamente e o componente mecânico da adesão fibra-matriz também diminuiu rapidamente para maiores teores de umidade na matriz e / ou interface.

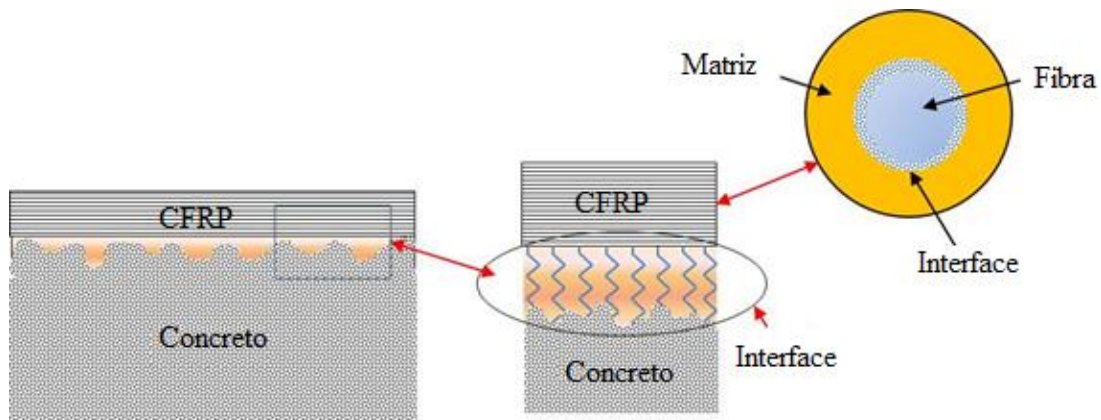


Figura 4. Representação esquemática da formação de interfaces duplas formadas pelo uso de laminados ou tecidos para reforçar vigas de concreto armado. Uma interface concreto-resina e uma interface fibra-matriz.

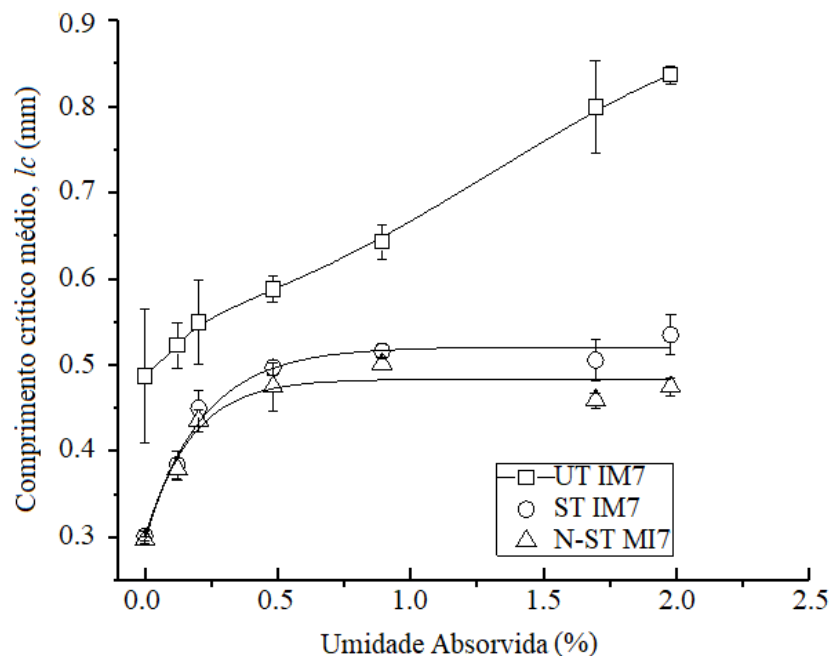


Figura 5. Comprimento do fragmento de fibra em função da umidade absorvida na interface da matriz no compósito, para fibras de carbono superficiais não tratadas (UT IM7); superfície tratada com agente de adesão de silano Fibras de carbono IM7 (ST IM7) e fibras de carbono de superfície IM7 tratadas com ácido nítrico e agente de adesão de silano (N-ST IM7), (J. I. Cauch-Cupul et al., 2011)

Perez-Pacheco, et al (2013) concluíram que a microestrutura da interface desempenhou um papel significativo no processo de difusão de umidade em um laminado de fibra de carbono-epóxi. A Figura 6 mostra as isotermas de absorção de umidade para um laminado composto submetido a vários ambientes de umidade relativa. Eles também concluíram que os efeitos da umidade absorvida na região interfacial prejudicavam a resistência interfacial entre a fibra e a matriz epóxi e, portanto, o desempenho do compósito. O uso de 3-glicidoxipropiltrimetoxissilano como agente de adesão de matriz de fibras aumentou a adesão da matriz de fibras. As tensões de plastificação, intumescimento e qualquer degradação epoxídica devido à hidrólise podem ter contribuído para os mecanismos de falha da matriz. Plastificação da matriz epóxi pela umidade leva à mudança na temperatura de transição vítrea (T_g), afetando a resposta mecânica do compósito. Foi observado que a resistência à tração dos laminados feitos com o agente de adesão de silano mostrou uma

diminuição, mas após uma absorção de umidade de aproximadamente 0,45%, a resistência à tração permaneceu constante. Então, o uso de um agente de adesão de silano adequado para melhorar a adesão resultou em propriedades mecânicas melhoradas e reduziu a dependência das propriedades da umidade sob carga de tração (ver figuras 7 e 8).

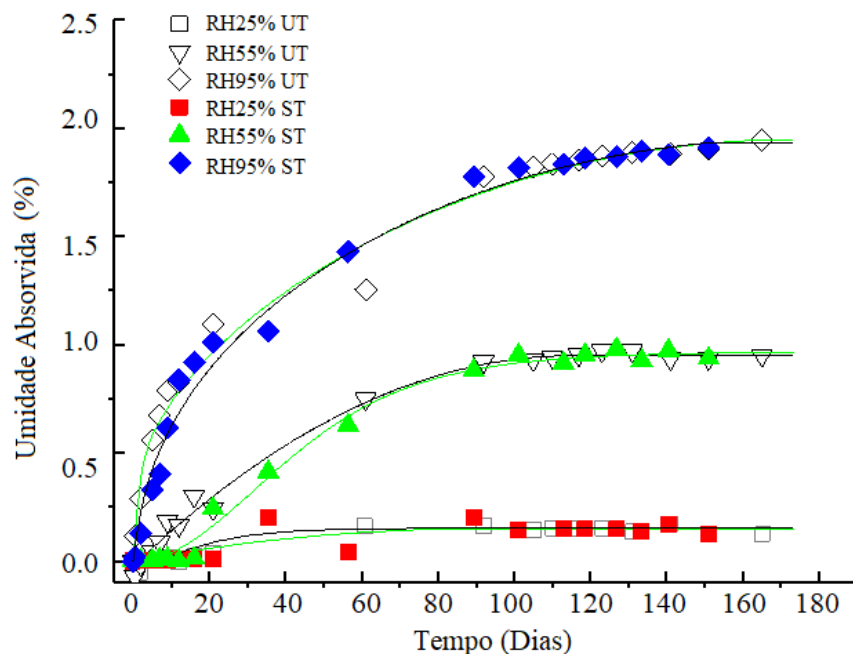


Figura 6. Absorção de umidade no laminado de material compósito para diferentes ambientes de umidade relativa. Sem tratamento: (UT) tratamento de superfície com silano (ST). RH25% UT, RH55% UT e RH95% UT, e com fibras tratadas superficialmente com silano RH25% ST, RH55% ST e RH95% ST. (Perez-Pacheco, et al (2013))

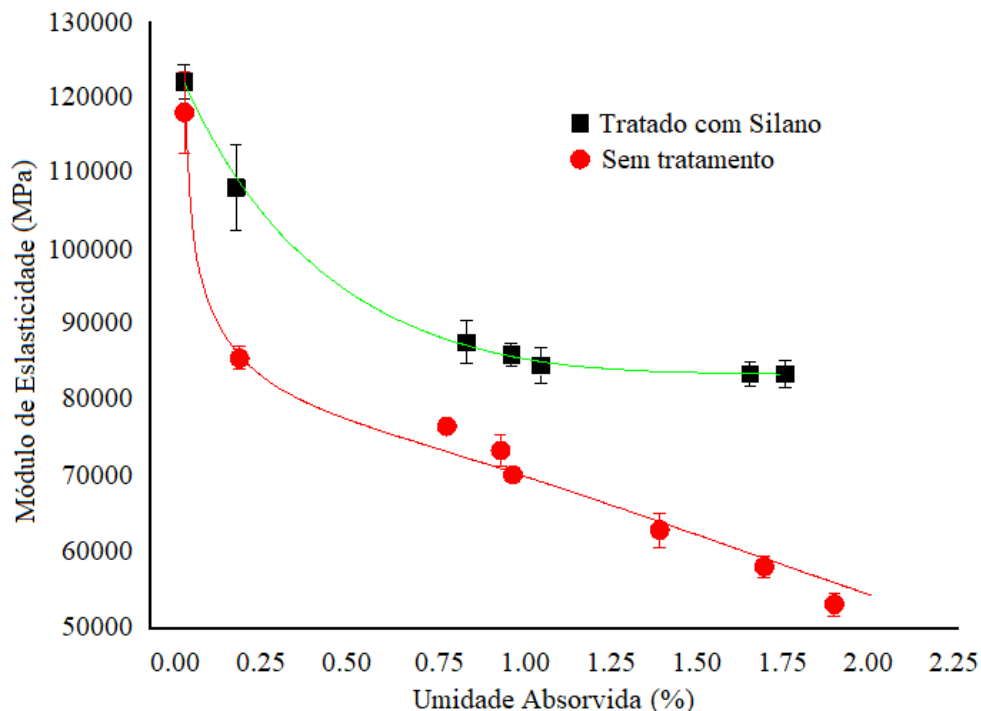


Figura 7. Comportamento do módulo elástico em relação à umidade absorvida pelo material compósito com a fibra tratada e não tratada, respectivamente. (Perez-Pacheco, et al, 2013)

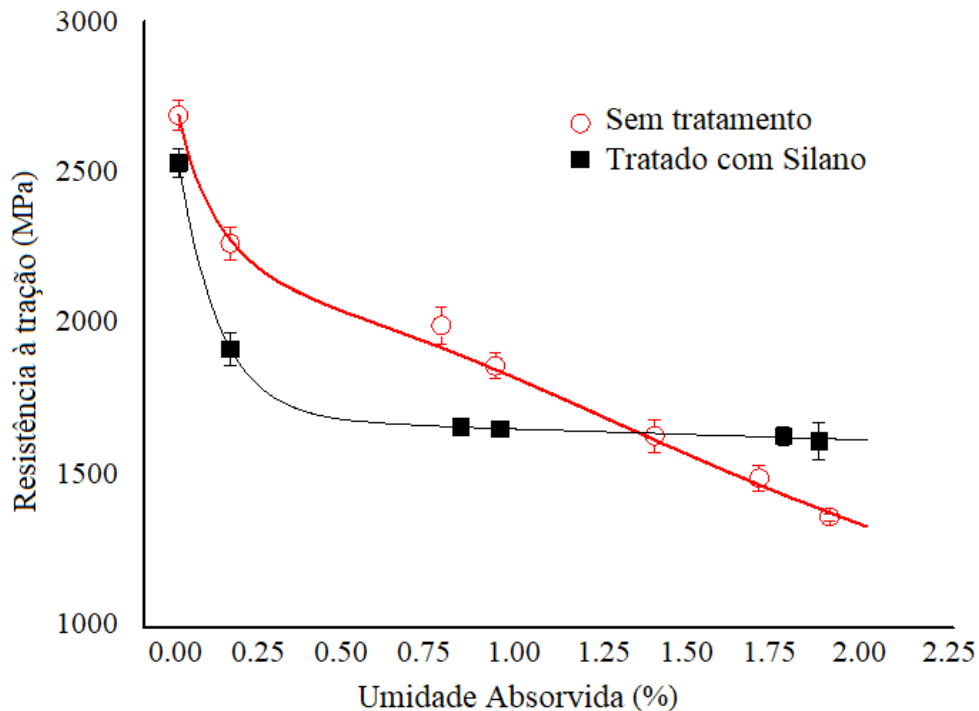


Figura 8. Resistência à tração de um material CFRP fabricado de material compósito após sofrer degradação higroscópica, para duas condições diferentes de interface fibra-matriz, ou seja, para fibras tratadas e não tratadas, respectivamente (Perez-Pacheco, et al, 2013)

O comportamento e o potencial da combinação de proteção contra corrosão e técnicas de reparo com CFRP para a reabilitação de vigas RC danificadas pela corrosão foi demonstrado por Swamy RN et al, 1999 e Sebastian WM, 2001. Eles descobriram que este tipo de arranjo pode melhorar a capacidade de carga de vigas RC corroídas e fornece o espaço para o revestimento dos materiais de proteção contra corrosão. Eles também propuseram que as tiras de ancoragem em U igualmente espaçadas, juntamente com as tiras longitudinais, formem um sistema de reforço externo para a viga RC corroída, que restringe a extensão da fibra na direção longitudinal na área de interseção. Como o valor da deformação é maior neste local, permite o uso total da resistência do material compósito fibroso. Portanto, qualquer projeto que possa reduzir o efeito da concentração de tensão na área de interseção das tiras de ancoragem longitudinais e em U pode ajudar a viga a escapar do modo de falha prematura da ruptura da fibra e atingir sua capacidade de carga projetada.

Como pode ser visto, as questões ambientais são extremamente importantes ao projetar uma junta laminada de compósito de concreto para a reabilitação de vigas. Todos os modelos descritos no item 2.1 deste trabalho consideram as propriedades mecânicas do laminado compósito, que, como visto nas figuras 7 e 8, diminuem em função da umidade absorvida. Portanto, o laminado compósito deve ser projetado com dimensões como espessura e largura, apropriadas aos valores de rigidez e resistência, sejam aquelas propriedades estimadas após serem degradadas pela absorção de umidade ou pela inclusão de um fator de segurança apropriado às propriedades mecânicas compostas antes da exposição ao ambiente. Outra abordagem seria fornecer um revestimento protetor para evitar a absorção de umidade, especialmente nas bordas do laminado.

4. CONCLUSÃO

Um método eficaz para reforçar as vigas de concreto existentes na flexão consiste na colagem de laminados compósitos reforçados com fibras nas faces de tração das vigas. No entanto, muitas vezes é difícil desenvolver a capacidade total de resistência composta devido a falha prematura devido a delaminação e descolamento do laminado. As condições na interface entre o compósito e o concreto requerem um entendimento completo, e estudos preliminares dos parâmetros de adesão entre o compósito e o concreto são necessários para determinar os comprimentos efetivos de transferência de tensão necessários para atingir a capacidade de resistência do compósito. Uma análise teórica para o comportamento de juntas aderidas de material composto-concreto também foi incluída nesta revisão. A durabilidade da interface material composto-concreto também é muito importante, especialmente quando a estrutura é exposta tanto à temperatura quanto à umidade. Na literatura técnica, nenhuma referência é feita às duas questões interfaciais, ou seja, a interface resina polimérica-concreto e a interface fibra-matriz no próprio compósito. A durabilidade do laminado compósito mostra-se afetada pela absorção de umidade, resultando assim em uma redução de resistência e rigidez superior a 30%.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Civil da Universidad Marista de Mérida pelo gentil apoio dado ao Sr. Poot Cauich e pelo fornecimento de materiais para o trabalho experimental.

6. REFERÊNCIAS

- Adamson, M. J. (1980), *Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials*, Journal of Materials Science, Volume 15, I (7): 1736–1745, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00550593>
- Adhikary, B. B. and Mutsuyoshi, H., (2001). *Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet*, Proceedings of the 5th international symposium on fiber reinforced Concrete structures (FRPCRS-5), Thomas Telford Publishing, 371-378.
- Aguiar, J. B., Camoes, A. and Vaz, N. F. (2008), *Effect of temperature on RC elements strengthened with CFRP*. Materials and Structures 41:1133–1142, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9311-4>
- Aiello, M. A., Focacci, F., Nanni, A. (2001), *Effects of thermal loads on concrete cover of fiber-reinforced polymer reinforced elements: theoretical and experimental analysis*. ACI Materials Journal, 98(4):332–339.
- Bank, L. C., Gentry, T. R., Barkatt, A. (1995), *Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14(6), 559–587, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400602>
- Bizindavyi, L., Neale, K. W. (1999), *Transfer lengths and bond strength for composites bonded to concrete*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 3(4):153–160. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:4\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:4(153))
- Bond, D. A. (2005), *Moisture Diffusion in a Fiber-reinforced Composite: Part I – Non-Fickian Transport and the Effect of Fiber Spatial Distribution*, Journal of Composite Materials, Vol. 39(23): 2113-2141, <https://doi.org/10.1177/0021998305052030>
- Buyukozturk, O., Hearing, B. (1998), *Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP*. ASCE, Journal of Composites for Construction; 2(3):138–144, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:3\(138\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:3(138))

- Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2004), *Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*. Construction and Building Materials, 18:9-19, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00094-1)
- Camli, U. S. and Binici, B. (2007), *Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry*. Construction and Building Materials, 21:1431-1446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.003>
- Cauich-Cupul, J. I, Pérez-Pacheco, E., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of moisture absorption on the micromechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 46:6664–6672, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5619-0>
- Chajes, M. J., Finch, W. W., Januszka, T. F., Thomson, T. A. (1996), *Bond and force transfer of composite materials plates bonded to concrete*. ACI Structural Journal, 93(2): 208–217.
- Chen, F. J., Teng, G, J. (2001), *Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete*, Journal of Structural Engineering, 127(7): 784-791, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784))
- Cho, J.-R., Park, S. Y., Cho, K., Kim, S. T., Kim, B.-S. (2012) *Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector*, Canadian Journal of Civil Engineering, 39(12): 1311-1320, DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0573>
- CNR—Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (2004), “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures (CNR-DT 200/2004)*” Rome, Italy, 144 pp
- Dai, J. G., Ueda, T. and Sato, Y. (2006), *Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pull-out tests*. Journal of Advanced Concrete Technology, 4:133-145, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.4.133>
- De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3): 256-264.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima Neto, A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A., Freire, M. C. (2018), “*Influence of anchorage on flexural strength of beams strengthened with CFRP sheets*”, Revista ALCONPAT, 9 (1): 30 – 47, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>
- FIB (2001), *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, FIB bulletin 14 Technical Report.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., Raiche, A. (2004), *Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbon-fiber reinforced polymer*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):211–218, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(211))
- Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., Saleh, K. R. (1999), *Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminate*. ACI Structural Journal, 96(5):865–874.
- Grace N. F., Singh S. B. (2005), *Durability evaluation of carbon fiber-reinforced polymer strengthened concrete beams: experimental study and design*. ACI Structural Journal, 102(1):40–53.
- Hamoush, S. A., Ahmad, S. H. (1990), *Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams*. Materials and Structures; 23:116–125, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472571>
- Hamze-Ziabari, S. M. and Yasalovi, A. (2017), *Predicting bond strength between FRP plates and concrete substrate: Applications of GMDH and MNL approaches*, Journal of Advanced Concrete Technology 15: 644-661, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.15.644>
- Hawileh, R. A., Nawaz, W., Abdalla, J. A., Saqan, E. I. (2015), *Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams*, Composite Structures 122: 468–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>

- Japan Concrete Institute JCI. 2003. "Technical report of technical committee on retrofit technology." Proc., Int. Symp. on the Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Sapporo, Japan
- Jeffries, J. M., (2004), *Bond behavior of fiber reinforced polymer laminates to concrete subjected to varied surface preparation*". Masters Theses. 2498.
- Karbhari, V. M., Engineer, M. (1996), *Effect of environmental exposure on the external strengthening of concrete with composite–short term bond durability*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 15:1194–1216., DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449601501202>
- Karbhari, V. M., Shulley, S. B. (1995), *Use of composites for rehabilitation of steel structures – determination of bond durability*. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, 7(4):239–245, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:4\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(239))
- Karbhari, V. M., Zhao, L. (1998), *Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening*. Composite Structures, 40(3-4):293–304, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00031-2)
- Katz, A., Berman, N., Bank, L. C. (1999), *Effect of high temperatures on bond strength of FRP rebars*. ASCE Journal of Composites for Construction, 3(2):73–81, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A. and Aziz, A. (1998). *Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC members*, Journal of Composites and Construction, ASCE, 2(4):195-203, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195))
- Khan, A. R. and Shamsoun, F. (2014), *Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Wraps with and without End Anchorages*, Procedia Engineering 77: 123 – 130, <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.011>
- Asp, L. E. (1998), *The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite*. Composites Science and Technology, Vol. 58, (6): 967-977, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00222-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00222-4)
- Leung, C. K. Y. (2001), *Delamination failure in concrete beams retrofitted with a bonded plate, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 13, Issue 2, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:2\(106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(106))
- Liau, W. B., Tseng, F. P. (1998), *The effect of long-term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites*, Polymer Composites, 19:440-445, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10118>
- Lorenzis, L. D., Miller, B., Nanni, A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3):256–264.
- Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005), *Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete*, Engineering Structures, 27: 920-937, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>
- Lu, X. Z., Ye, L. P., Teng, J. G. and Jiang, J. J. (2005), *Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete*. Engineering Structures, 27(4): 564-575, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.015>
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie Jr., J. W. (1999), *Moisture Diffusion in Epoxy Systems*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 71, 787-798, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A)
- Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y. Ueda, T. and Kakuta, Y. (1997). *A study on bond mechanism of carbon fiber sheet*, in Proceedings of 3rd international symposium on nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Sapporo, Japan Concrete Institute, 1:279-285
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1998), *Theoretical stress–strain model for confined concrete*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 114(8):1804–1826, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))

- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., Yoshizawa, H. (2001), *Bond behavior between fiber reinforced polymer laminates and concrete*. ACI Structural Journal, 98(3):359–367.
- Neubauer, U. and Rostasy, F. S. (1997), *Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates*. Proceedings of seventh international conference on structural faults and repairs, Edinburgh, ECS Publications, 1:109-118.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1997), *Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 23(7):903–911, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:7\(903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903))
- Pendhari, S. S., Kant, T., Desai, Y. M. (2008), *Application of polymer composites in civil construction: A general review*. Composite Structures 84:114–124, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.007>
- Pérez-Pacheco, E., Cauich-Cupul, J. I., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J. (2013), *Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 48:1873–1882, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6947-4>
- Pérez-Pacheco, E., Moreno-Chulim, M. V., Valadez-González, A., Rios-Soberanis, C. R. and Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of the interphase microstructure on the behavior of carbon fiber/epoxy resin model composite in a thermal environment*, Journal of Materials Science, 46:4026–4033, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5331-0>
- Plevris, N., Triantafillou, T. C., (1994), *Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 120(3):1016–1042, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(1016))
- Selzer, R. and Friedrich, K. (1995), *Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites*. Journal of Materials Science, Vol. 30, No. 2, 334, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00354392>
- Saadatmanesh, H., Tannous, F. E. (1999). *Long term behavior of aramid fiber reinforced plastic (AFRP) tendons*. ACI Materials Journal, 96(3):297–305.
- Sebastian, W. M. (2001), *Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 127(7):792–798, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792))
- Springer, G. S. (1984), *Environmental Effects on Composite Materials*, Vol. 1, Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc.
- Swamy, R. N., Jones, R., Bloxham, J. W. (1987), *Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates*. Structural Engineer, 65(2):59–68.
- Swamy, R. N., Mukhopadhyaya, P. (1999), *Debonding of carbon-fibre-reinforced polymer plate from concrete beams*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 134:301–317, DOI: <https://doi.org/10.1680/istbu.1999.31897>
- Täljsten, B. (1997), *Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 17(4):319–327, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00018-3)
- Tanaka, T., (1996), *Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement*, Thesis (PhD). Hokkaido University.
- Lim, T.-Y., Paramasivam, P. and Lee, S.-L. (1987), *Behavior of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams in Flexure*. Journal of Structural Engineering; 113-12:2439. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:12\(2439\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:12(2439))
- Todo, M., Nakamura, T. and Takahashi, K. (2000), *Effects of moisture absorption on the dynamic interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy composites*. Journal of Composite Materials, 34(8): 630–648, DOI: <https://doi.org/10.1177/002199830003400801>

- Van Gemert, D. (1980), *Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 1, 67-72(1. 996), DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(80\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(80)90060-3)
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie, J. W. Jr., (1999), *Relationships between Stoichiometry, Microstructure, and Properties for Amine-Cured Epoxies*, Journal of Applied Polymer Science; 71: 699–712, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D)
- Wang, C. Y., Shih, C. C., Hong, S. C., Hwang, W. C. (2004), *Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):219–28, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(219))
- Wang, S. and Chung, D. D. L. (2002), *Effect of moisture on the interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurement*, Composite Interfaces, Vol. 9, No. 5: 453-458, DOI: <https://doi.org/10.1163/15685540260256546>
- Xie, M., Hoa, S. V., Xiao, X. R. (1995), *Bonding steel reinforced concrete with composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14:949–63, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400903>
- Yuan, H., Wu, Z. and Yoshizawa, H. (2001), *Theoretical Solutions on Interfacial Stress Transfer of Externally Bonded Steel/Composite Laminates*. Doboku Gakkai Ronbunshu, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, 18 (675): 1-55, DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675_27

Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana

R. A. Medeiros-Junior^{1*} , G. S. Munhoz¹ , M. H. F. Medeiros¹ 

* Autor de Contato: medeirosjunior.ufpr@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepção: 16/07/2018 | Aceitação: 27/02/2019 | Publicação: 30/04/2019

Editor Associado Responsável: Dr. Pedro Garcés Terradillos

RESUMO

Essa pesquisa confronta as seguintes propriedades do concreto: absorção de água (por imersão e capilaridade), resistividade elétrica e resistência à compressão. Concretos com dois tipos de cimento foram ensaiados. Os resultados mostraram que os concretos com maior teor de pozolana apresentam maior resistividade e absorção por capilaridade, para relação água/cimento menor que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução no diâmetro dos poros. No entanto, para relação água/cimento de 0,60, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade. Ademais, a resistência à compressão e a resistividade elétrica são inversamente proporcionais a relação água-cimento, enquanto que a absorção por imersão e capilaridade são diretamente proporcionais a relação água/cimento. Correlações com elevados coeficientes de determinação foram encontradas entre os ensaios.

Palavras-chave: durabilidade; concreto; absorção; resistividade; resistência à compressão.

Citar como: Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), “Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 152 – 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

¹ Department of Civil Construction, Federal University of Parana - UFPR, Curitiba, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan

ABSTRACT

This research confronts the following concrete properties: water absorptions (by immersion and capillarity), electrical resistivity and compressive strength. Concrete mixtures with two types of cement were tested. Results showed that concretes with higher content of pozzolan had higher resistivity and greater absorption by capillarity, for water/cement ratios lower than 0,60. This behavior is attributed to reduced pore diameters and microstructure densification. However, for water/cement ratio of 0,60, concrete with lower content of pozzolan presented higher absorption by capillarity. It was observed that the compressive strength and the electrical resistivity behaved inversely proportional to the water/cement ratio, and the absorption by immersion and capillarity are directly proportional to the water/cement ratio. Correlations with high determination coefficients were found between tests.

Keywords: durability; concrete; absorption; resistivity; compressive strength.

Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana

RESUMEN

Esta investigación correlaciona las siguientes propiedades: absorción de agua (por inmersión y capilaridad), resistividad eléctrica y resistencia a compresión. Se ensayaron dos tipos de hormigones con cementos diferentes. Los resultados mostraron que los hormigones con mayor contenido de puzolanas y relación agua-cemento menor que 0,60, presentaron mayor resistividad y absorción por capilaridad. Ese comportamiento se atribuye a la reducción del diámetro de los poros. Por otro lado, en los hormigones con relación agua/cemento de 0,60, pero con menor contenido de puzolanas, también se observó un aumento de la absorción por capilaridad. Como esperado, la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica fueron inversamente proporcionales a la relación agua/cemento, en cuanto que la absorción por inmersión y capilaridad se mostraron directamente proporcionales a la relación agua/cemento. Las correlaciones encontradas entre los ensayos tuvieron altos coeficientes de determinación.

Palabras clave: durabilidad; hormigón; absorción; resistividad; resistencia a la compresión.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto tem impacto direto na economia da indústria da construção civil. Portanto, é essencial compreender os mecanismos que causam a degradação dessas estruturas. Algumas das principais variáveis que controlam os processos de degradação no concreto são a resistividade elétrica, a absorção de água e a porosidade. A resistividade elétrica pode ser correlacionada com a taxa de corrosão e seu nível de deterioração, enquanto as absorções de água (por imersão e capilaridade) podem ser diretamente relacionadas à difusividade de íons agressivos na microestrutura do concreto. Além disso, a porosidade (tamanho dos poros, conectividade e tortuosidade) é, também, um aspecto importante que pode influenciar todas essas propriedades, incluindo a resistência à compressão (Hornbostel et al., 2013; Ye et al., 2017). Ramezani-pour et al. (2011) estudaram a relação entre a resistividade do concreto, a absorção de água, a penetração de cloretos e a resistência à compressão, a fim de oferecer uma melhor

compreensão sobre essas propriedades. Os autores concluíram que a resistividade, a absorção de água e a penetração de cloretos podem ser correlacionadas. Entretanto, ao contrário do esperado, a resistência à compressão não pôde expressar uma correlação clara com a resistividade elétrica, uma vez que ambos os parâmetros possuíam variáveis (como o tipo de cimento) que não foram contabilizadas nesse estudo. Portanto, o presente artigo tenta preencher essa lacuna com o estudo de cimentos com diferentes teores de pozolana.

Ainda nessa perspectiva, Andrade e D'Andrea (2011), Silva et al. (2011), Ait-Mokhtar et al. (2013) e Sengul (2014) também estudaram extensivamente essas correlações. De acordo com suas pesquisas, devido à relação existente entre a porosidade, permeabilidade, nível de saturação, resistência mecânica, penetração de cloretos e a difusividade, a resistividade elétrica pode ser muito conveniente para a previsão de vida útil dos elementos de concreto.

A influência de diferentes tipos de cimento e adições minerais nas propriedades físico-elétricas do concreto foi investigada em diversos estudos (López e Castro, 2010; Yildirim et al., 2011; Lübeck et al., 2012; Hoppe Filho et al., 2013; Medeiros-Junior e Lima, 2016). Alguns deles testaram substituições parciais de cimento por escória de alto forno, sílica ativa e cinza volante. Em geral, os autores concluíram que maiores coeficientes de resistividade elétrica e menores absorções de água foram encontrados em concretos com substituições parciais por adições minerais devido ao refinamento dos poros, que reduz a conectividade. No entanto, os efeitos ainda não são totalmente compreendidos. A cura do concreto, por exemplo, pode desempenhar um papel importante nessas relações. Presuel-Moreno et al. (2013) e Sabbag e Uyanik (2018) concluíram que o processo de cura influencia a permeabilidade do concreto, refletindo em maiores taxas de absorção de água e resistividade elétrica, e menor resistência à compressão. Segundo esses autores, melhores resultados foram encontrados quando corpos de prova foram curados imersos em água ou, ao menos, armazenados em câmara úmida.

O objetivo dessa pesquisa é investigar as possíveis correlações entre a absorção de água do concreto (por imersão e capilaridade), a resistividade elétrica e a resistência à compressão, comparando dois tipos de cimento com diferentes teores de cinza volante (12,5% e 27,0%). Portanto, esse estudo procura determinar a intensidade das correlações entre essas variáveis por meio dos coeficientes de correlação e como essas relações são afetadas pelos diferentes teores de pozolana.

Por fim, os resultados obtidos com essa pesquisa são úteis para melhor compreender a relação entre os parâmetros associados à durabilidade das estruturas de concreto e sua resistência à compressão, que é a principal variável no controle de qualidade de projetos e na construção de edifícios.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Nesse estudo, duas misturas com diferentes teores de pozolana foram testadas. O Traço I, composto por cimento Portland IP modificado com pozolana (12,5% de cinza volante) e o Traço II, composto por cimento Portland-pozolânico IP-MS (27,0% de cinza volante). A composição química e as propriedades físicas de ambos os cimentos estão listadas na Tabela 1. Além disso, as principais características dos agregados miúdo e graúdo são mostradas na Tabela 2. Areia natural foi utilizada como agregado miúdo, proveniente do Rio Iguazu, Porto Amazonas.

Tabela 1. Características mecânicas, físicas e químicas do cimento.

Propriedades e Características	Unidade	Traço I: Cimento Portland Modificado	Traço II: Cimento Portland Pozolânico
Teor de cinza volante	%	12,5	27,0
Al ₂ O ₃	%	6,22	9,77
SiO ₂	%	21,98	29,17
Fe ₂ O ₃	%	3,08	3,84
CaO	%	54,46	45,04
MgO	%	3,68	2,94
SO ₃	%	2,54	2,27
Perda ao fogo	%	5,40	3,54
CaO livre	%	0,66	0,61
Resíduos insolúveis	%	11,04	25,62
Teor alcalino (Na ₂ O e K ₂ O)	%	0,85	1,15
Expansibilidade	mm	0,24	0,26
Tempo de início de pega	h:min	4:20	4:26
Tempo de fim de pega	h:min	5:06	5:11
Blaine	cm ² /g	3.560	4.193
# 200	%	1,83	0,49
# 325	%	8,33	2,78
Resistência à compressão (1 dia)	MPa	11,8	13,0
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	25,3	25,9
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	32,1	32,9
Resistência à compressão (28 dias)	MPa	41,0	45,4

Tabela 2. Características dos agregados utilizados.

Características dos agregados	Unidade	Traço I		Traço II	
		Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
Tipo	-	Areia natural	Brita basáltica	Areia natural	Brita granítica
Dimensão Máxima Característica	mm	2,36	19	2,36	19
Massa específica	g/cm ³	2,35	2,71	2,65	2,71
Absorção de água	%	1,88	0,40	0,70	0,20

De acordo com Bem et al. (2018), aditivos químicos podem afetar as propriedades elétricas do concreto. Portanto, não foram utilizados nesta pesquisa. A dosagem, em massa, das misturas de concreto foi fixada em 1:1,4:2,1 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo). O consumo (kg/m³) dos materiais utilizados em cada traço é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Traços dos espécimes de concreto.

Código	Traço I			Traço II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Cimento (kg/m³)	489,8	480,0	470,6	484,9	471,2	458,3	446,0
Agregado miúdo (kg/m³)	685,7	672,0	658,8	678,9	659,7	641,5	624,4
Agregado graúdo (kg/m³)	1028,6	1008,0	988,2	1018,3	989,5	962,3	936,6
Água (kg/m³)	195,9	240,0	282,4	203,7	226,2	247,5	267,6
Relação água/cimento	0,40	0,50	0,60	0,42	0,48	0,54	0,60

Os corpos de prova de concreto consistiram em amostras cilíndricas, medindo Ø100 mm x 200 mm de altura. Essa geometria foi escolhida devido aos dados tabelados do fator de correção de forma, que é necessário para determinar a resistividade elétrica. De acordo com a norma UNE 83988-2 (2014), para essa geometria, o fator é 0,377.

Os concretos foram moldados seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 5738 (2015). Assim, 24 horas após a moldagem, as amostras foram desmoldadas e curadas em câmara úmida (umidade relativa $\geq 95\%$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) por, no mínimo, 28 dias. Finalmente, como três corpos de prova foram utilizados para cada teste realizado, os resultados discutidos nesse estudo são a média de três repetições.

2.2 Métodos

2.2.1 Resistividade elétrica

O ensaio não destrutivo de resistividade elétrica foi realizado de acordo com a norma europeia UNE 83988-2 (2014), que estabelece a configuração do experimento para a técnica de quatro pontos (método de Wenner). Nessa abordagem, quatro eletrodos são colocados sobre a superfície da amostra. Então, o concreto é submetido a uma corrente elétrica aplicada entre os dois eletrodos externos. Dessa forma, a diferença resultante no potencial elétrico pode ser medida pelos dois eletrodos internos. Para cada amostra foram necessárias três medidas com um ângulo de 120° de distância entre elas. Os corpos de prova estavam em condição saturada com superfície seca durante o experimento.

2.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos mesmos corpos de prova utilizados nos experimentos de resistividade elétrica. Além disso, os procedimentos de ensaio foram seguidos conforme descrito na norma brasileira NBR 5739 (2018). Nesse contexto, as amostras foram colocadas em uma prensa hidráulica, onde foram carregadas por compressão até a ruptura. Durante o ensaio, foi utilizado um equipamento com capacidade de carga de 1000 kN, com taxa de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

2.2.3 Absorção de água por imersão

O teste de absorção de água por imersão, realizado apenas para as amostras do Traço II, obedeceu às prescrições da norma brasileira NBR 9778 (2009). O experimento teve início com a secagem das amostras em estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), até a variação de massa ser menor que 0,10 g. Em seguida, a massa seca em estufa foi registrada. Na sequência, os corpos de prova cilíndricos foram imersos em água durante 72 horas. A imersão foi realizada de acordo com a norma brasileira: 1/3 da altura das amostras imersa nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e, finalmente, a imersão total da amostra de concreto nas 64 horas restantes. Assim, a taxa de absorção de água por imersão,

em porcentagem, representa a diferença entre a massa da amostra após a imersão (72h) e sua massa seca em estufa.

2.2.4 Absorção de água por capilaridade

O objetivo desse procedimento é monitorar o aumento da massa das amostras devido à absorção de água por capilaridade. Dessa forma, o ensaio é iniciado com a secagem das amostras em estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), até a variação de massa ser menor que 0,10 g, segundo a NBR 9779 (2012). Depois disso, os corpos de prova foram colocados em uma camada de água de (5 ± 1) mm, com fundos expostos, e suas massas foram aferidas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de exposição. Essas medidas também foram usadas para determinar a absorvidade (S), de acordo com a Eq.1.

$$S = \frac{V_{\text{água}}}{A \times \sqrt{t}} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde, $V_{\text{água}}$ representa o volume de água absorvida por capilaridade, em mm^3 ; A representa a área da face da amostra em contato com a água, em mm^2 ; e t é o período de exposição, em horas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistividade elétrica e resistência à compressão

A Tabela 4 mostra a resistividade elétrica e a resistência à compressão para cada traço e relação água/cimento, aos 28 dias. De acordo com a Tabela 4, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistividade elétrica e a resistência à compressão. À medida que a relação água/cimento aumenta, a porosidade interna da microestrutura do concreto e sua conectividade também aumentam. Portanto, quanto maior a permeabilidade do concreto, menor é a resistência mecânica, assim como a resistência ao fluxo de corrente elétrica. Esse comportamento já foi constatado por vários estudos (Mehta e Monteiro, 2006; Ait-Mokhtar et al., 2013; Olsson et al., 2013).

Tabela 4. Resistividade elétrica e resistência à compressão.

Código	Traço I			Traço II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Resistividade elétrica ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)	8,3	5,5	4,3	14,9	11,5	9,7	8,7
Resistência à compressão (MPa)	45,2	33,2	21,4	49,3	41,0	32,0	27,9

Medeiros-Junior e Lima (2016) e Yu et al. (2017) também relataram o aumento da relação água/cimento com o aumento da porosidade dos corpos de prova. Dessa forma, a resistência ao fluxo de corrente elétrica diminui quando mais água está presente dentro dos poros de concreto. Para garantir isso, foi realizado o teste de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP) nas amostras G0,42 e G0,54. Os resultados mostraram que a porosidade foi de 23,6% e 36,3%, respectivamente. Além disso, os diâmetros médios dos poros foram de 43,9 nm e 48,8 nm, para cada concreto testado.

O Traço II apresentou os maiores valores de resistividade e resistência à compressão entre as misturas testadas (Tabela 4). A maior quantidade de pozolana no Traço II contribuiu com o refinamento dos poros, restringindo sua conectividade. Este efeito contribuiu diretamente para a redução da permeabilidade e aumentou a resistência contra o fluxo de corrente elétrica. Resultados semelhantes foram encontrados por López e Castro (2010), Yildirim et al. (2011) e Medeiros-Junior et al. (2014). Além disso, a substituição parcial do cimento por pozolana resultou no

consumo do hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - em uma combinação química denominada Reação Pozolânica. Esse processo hidrata as misturas cimentícias de forma gradual e lenta, contribuindo para o aumento da resistência mecânica ao longo do tempo, conforme comprovam Medeiros-Junior e Lima (2016).

Finalmente, a fim de confirmar as diferenças observadas nos resultados obtidos para cada tipo de cimento adotado, os valores da Tabela 4 foram submetidos a um tratamento estatístico. A Análise de Variância (ANOVA) com fator único e significância de 5% demonstrou que a resistividade elétrica e a resistência à compressão foram estatisticamente diferentes para cada grupo testado.

Isto posto, um gráfico com curvas para cada traço foi criado, correlacionando a resistividade elétrica com a resistência à compressão (Figura 1). Além disso, para descrever o comportamento dessas variáveis, optou-se por uma abordagem logarítmica. Esse foi o melhor ajuste de dados, e também foi utilizado por outros estudos (Andrade e D'Andrea, 2011; Wei e Xao, 2014; Medeiros-Junior et al., 2014).

Na Figura 1, ambos os parâmetros são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior a resistividade elétrica. Esse comportamento também foi observado por Dinakar et al. (2007) e Lubeck et al. (2012), e está relacionado com a clara influência que a porosidade tem sobre ambas as propriedades. Além disso, a boa correlação gráfica mostrada na Figura 1 (ambos os R-quadrado acima de 0,98) reafirma essa relação.

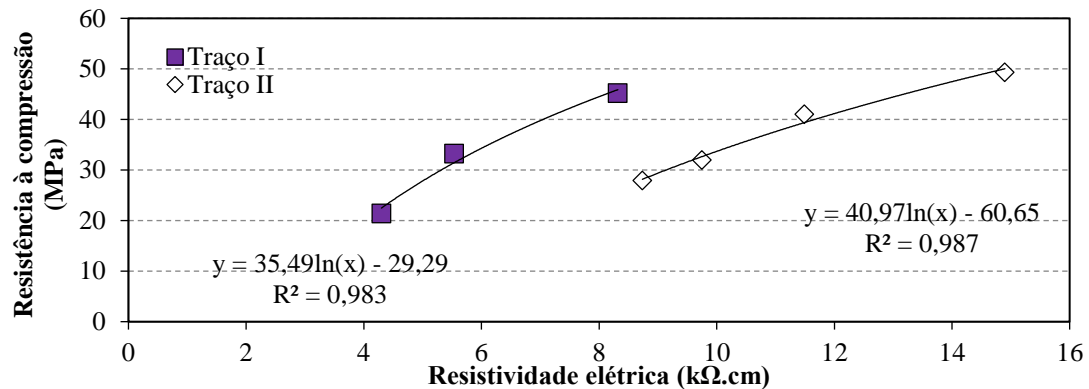


Figura 1. Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão.

Além disso, quando ambas as misturas são comparadas com a mesma faixa de resistência à compressão, também pode ser observado que a curva de correlação para o Traço II tem uma inclinação mais suave. Isso se deve ao maior conteúdo de pozolana no Traço II, que criou uma microestrutura mais densa com maior resistividade elétrica.

3.2 Absorção de água por imersão

As absorções de água por imersão foram de 3,67%, 4,32%, 5,69% e 6,36% para as amostras G0,42, G0,48, G0,54 e G0,60, respectivamente. Portanto, à medida que a relação água/cimento aumentou, também aumentaram os coeficientes de absorção. Isso já havia sido observado por Zhang e Zong (2014), Castro e Ferreira (2016), Gans (2017) e Pinto et al. (2018), e se deve, principalmente, à porosidade na microestrutura do concreto e à sua permeabilidade, uma vez que ambos são parâmetros significativamente influenciados pela relação água/cimento.

Além disso, de acordo com o Comité Euro-International du Béton (CEB 192, 1989), o concreto pode ser qualitativamente classificado como bom, médio ou ruim, de acordo com o nível de absorção por imersão. A Figura 2 correlaciona os resultados obtidos por meio dos experimentos com tais níveis. Na Figura 2, enquanto as maiores relações água/cimento (0,60 e 0,54) estão associadas a um concreto de baixa qualidade, os valores mais baixos desse parâmetro (0,42 e 0,48) permitiram classificar o concreto com uma qualidade média.

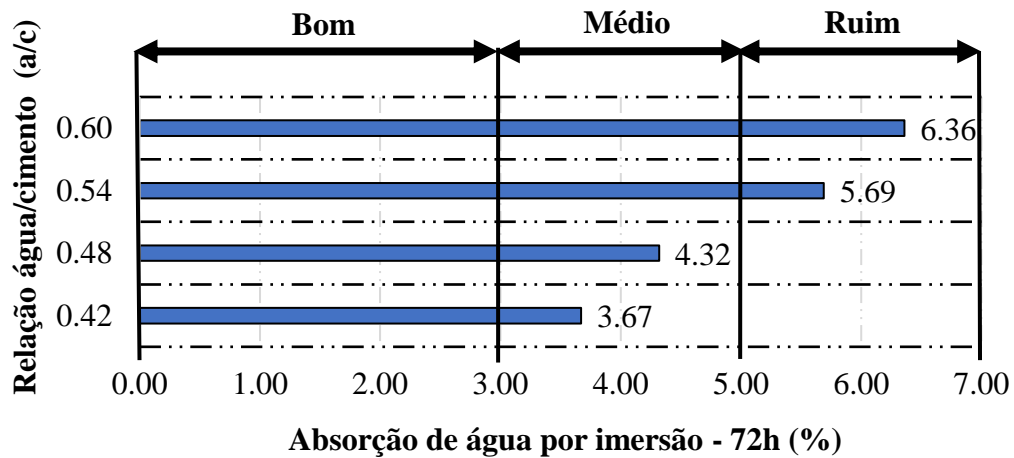


Figura 2. Absorção de água por imersão e qualidade do concreto de acordo com os critérios propostos pela CEB192 (1989).

A Figura 3 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão e a resistividade elétrica. Similarmente à Figura 1, uma abordagem logarítmica descreveu melhor o comportamento de ambas as grandezas.

A boa correlação obtida na Figura 3 retrata o comportamento inverso entre a absorção de água por imersão e a resistividade elétrica. Assim, a água absorvida na microestrutura do concreto aumenta sua condutividade elétrica e, conseqüentemente, reduz sua resistividade elétrica. A Figura 4 correlaciona a absorção de água por imersão e a resistência à compressão, usando uma abordagem logarítmica.

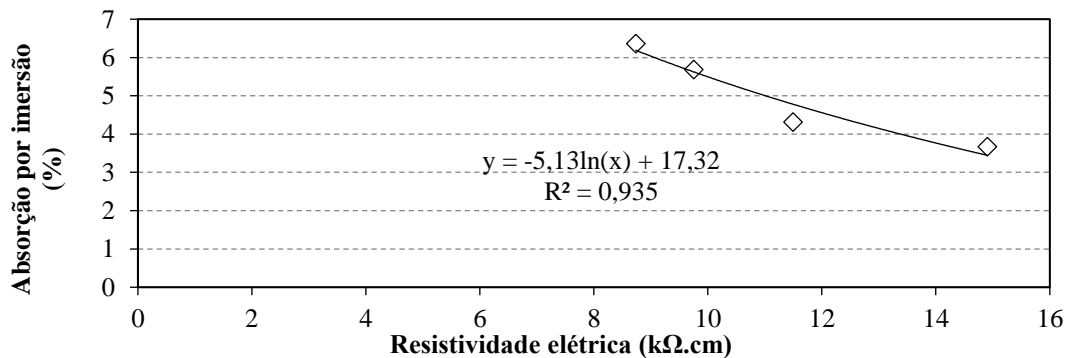


Figura 3. Correlação entre a resistividade elétrica e a absorção por imersão.

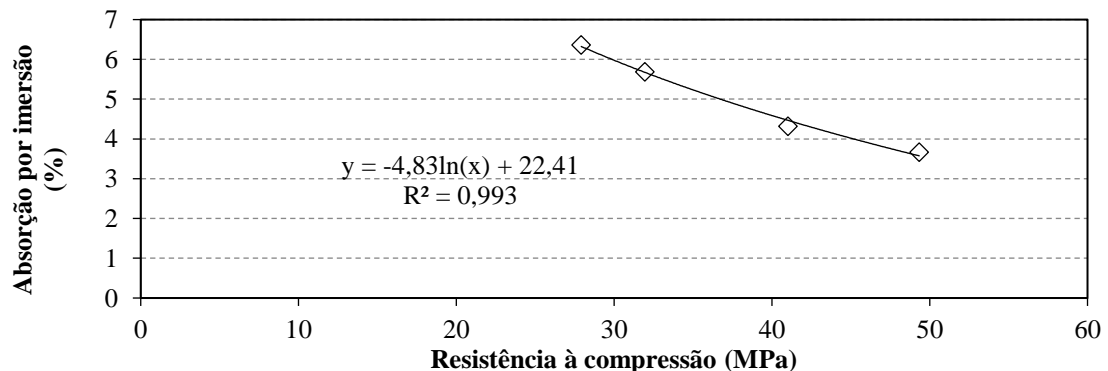


Figura 4. Correlação entre resistência à compressão e absorção por imersão.

De acordo com a Figura 4, à medida que a absorção de água por imersão aumenta, a resistência à compressão diminui. As curvas da Figura 3 e da Figura 4 têm o mesmo comportamento, pois os parâmetros que influenciam esses ensaios são semelhantes. Portanto, quanto maior a relação água/cimento, maior é a porosidade e sua conectividade. Isso implica na redução da resistência à compressão e resistividade elétrica, enquanto a absorção de água por imersão é aumentada.

Em resumo, comparando os valores de R-quadrado de ambos os gráficos (Figuras 3 e 4), pode-se notar que a absorção de água por imersão é melhor correlacionada com a resistência à compressão, do que com a resistividade elétrica. Isso pode estar relacionado com a dependência que a resistividade elétrica tem com a composição química da solução presente dentro dos poros do concreto (Ramezani-pour et al., 2011; Presuel-Moreno et al., 2013; Sabbag e Uyanik, 2018). Esse comportamento explica a baixa dispersão obtida na curva de regressão mostrada na Figura 3, embora tenha sido encontrado um alto coeficiente R-quadrado ($R^2 = 0,935$).

3.3 Absorção de água por capilaridade

As Figuras 5 e 6 mostram a variação da água absorvida por capilaridade ao longo do tempo para os Traços I e II, respectivamente. A absorção de água por capilaridade aumentou ao longo da exposição de 72 horas, em ambas as misturas. No entanto, à medida que a amostra aproximou sua capacidade máxima de absorção, uma tendência de estabilização foi identificada. Esse comportamento pode ser observado por diferentes inclinações nas curvas ao longo do tempo. Geralmente, o aumento no nível de absorção foi maior nas primeiras 12 horas de experimento.

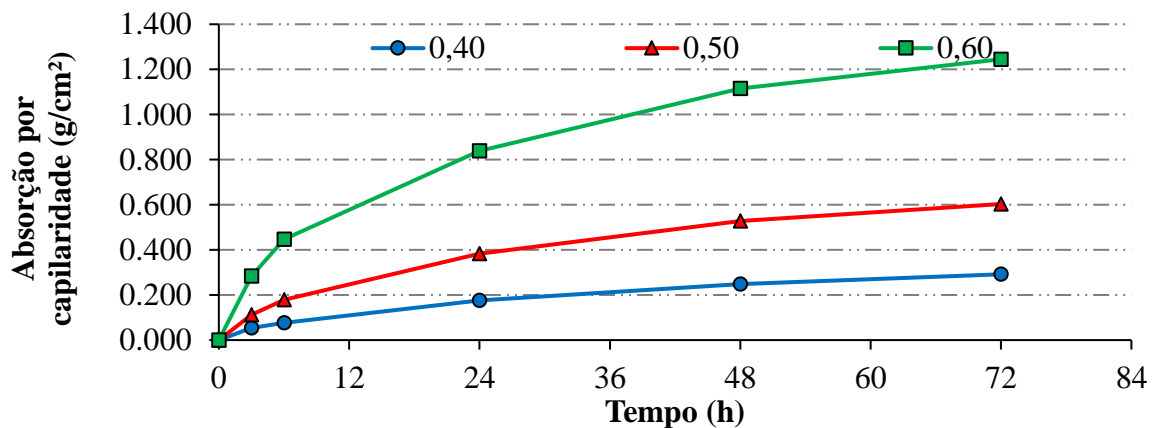


Figura 5. Absorção por capilaridade ao longo do tempo - Traço I.

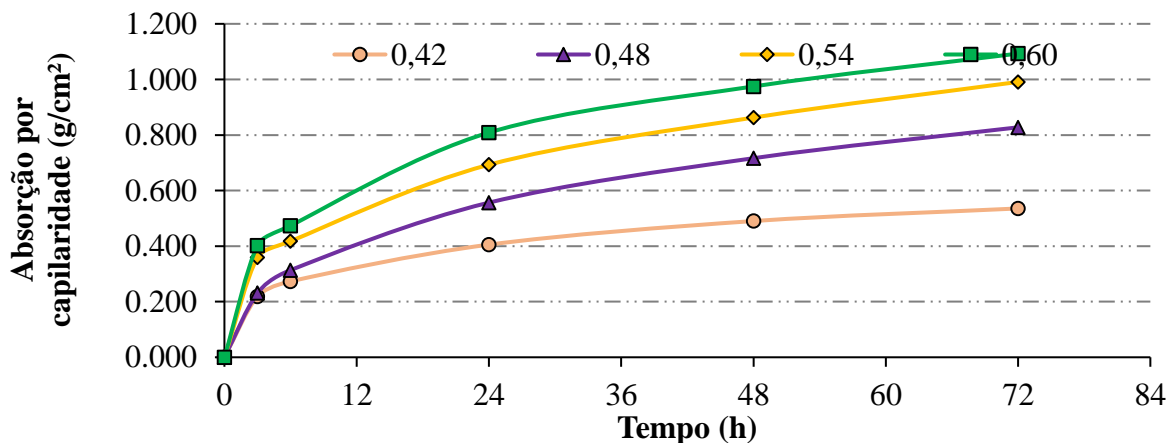


Figura 6. Absorção por capilaridade ao longo do tempo - Traço II.

Além disso, a absorção de água por capilaridade aumentou com a relação água/cimento. Dessa forma, conforme comprovado anteriormente pelo teste MIP, um concreto mais poroso contribui diretamente com a absorção e percolação da água.

Ademais, a fim de determinar a absorvidade do concreto, os resultados obtidos com a absorção pelo experimento de capilaridade foram usados na Eq. (1). A absorvidade dos corpos de prova variou de 0,034 a 0,147 g/(cm².min^{1/2}). A Figura 7 ilustra a correlação e a variação desse parâmetro de acordo com a relação água/cimento.

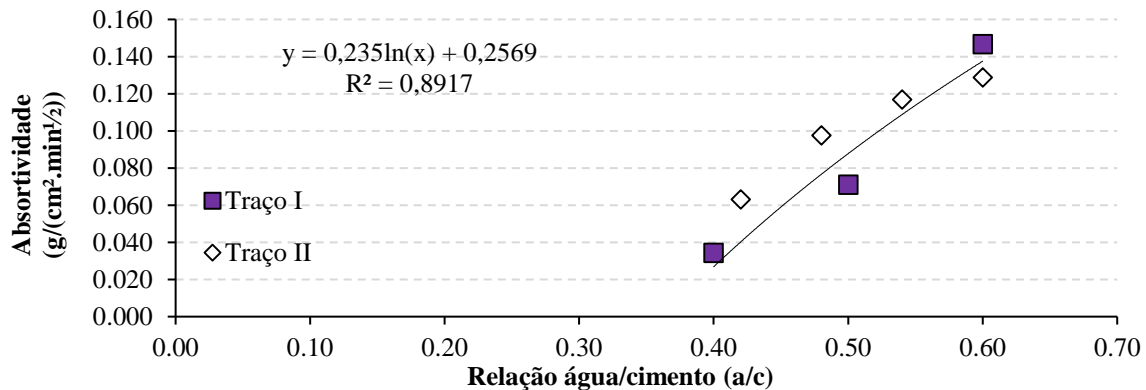


Figura 7. Variação de absorvidade com diferentes relações água/cimento.

Como mostrado na Figura 7, maiores relações água/cimento apresentaram maiores valores de absorvidade. Isso ocorreu, principalmente, devido ao aumento da porosidade. No entanto, comparando os dois traços, pode-se notar que o Traço II (com maiores quantidades de pozolana) teve coeficientes de absorção por capilaridade maiores do que o primeiro. Isso é observado visualmente nos pontos acima da linha de tendência, mostrada na Figura 7.

A principal razão para maiores coeficientes no Traço II foi o refinamento dos poros e a redução de seus diâmetros. Consequentemente, em associação com a tensão superficial da água, forças capilares mais fortes estiveram presentes e, consequentemente, mais água foi absorvida (Mehta e Monteiro, 2006; Yildirim et.al., 2011; Medeiros et.al., 2017).

Da mesma forma, Pinto et al. (2018) observaram o mesmo comportamento ao analisar a influência da carbonatação na absorção de água por capilaridade. Segundo López e Castro (2010), Chen et al. (2014) e Leung et al. (2016), quanto maior a substituição de cimento por pozolana, melhor a microestrutura se desenvolve e, portanto, menos porosa fica.

Em contrapartida, comparando os resultados da relação água/cimento igual a 0,60, observa-se que o comportamento de absorvidade foi o oposto, com o Traço I (com menor teor de pozolana) desenvolvendo coeficientes maiores. Isso também foi relatado por Olsson et al. (2013), e pode estar relacionado à tortuosidade dos poros. Nesse caso, maiores teores de substituição por pozolanas induzem a poros mais tortuosos, como observado por Medeiros-Junior e Lima (2016). Assim, apesar de suas forças capilares serem mais fortes, sua absorção pelos coeficientes de capilaridade é menor.

Em resumo, o efeito dos diâmetros reduzidos dos poros capilares associados à tensão superficial da água foi o principal responsável pelo aumento da absorção capilar em menores relações água/cimento (absorvidade do Traço II > Traço I). Por outro lado, para maiores relações água/cimento, a tortuosidade dos poros foi o principal fator que levou a menores coeficientes de absorção no Traço II.

Além disso, a absorção de água por capilaridade foi correlacionada com outras propriedades do concreto. A Figura 8 mostra a absorção capilar após 72 horas e a correlação com a resistividade elétrica. A Figura 9 apresenta o comportamento da absorção capilar versus a resistência à compressão.

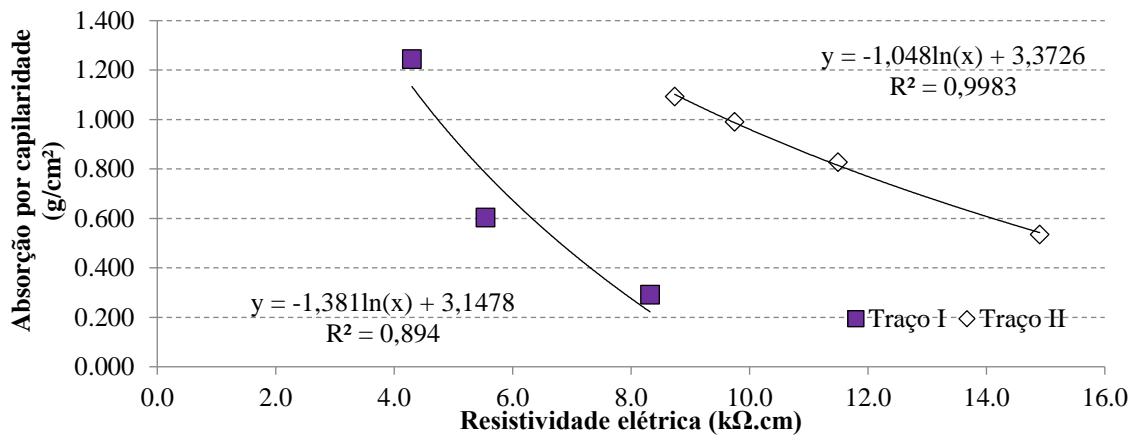


Figura 8. Correlação entre a resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade.

De acordo com a Figura 8, a absorção de água por capilaridade diminui à medida que a resistividade elétrica aumenta, para ambos os traços testados. Da mesma forma, de acordo com a Figura 9, a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão são parâmetros inversamente relacionados. Também foram encontrados bons coeficientes R-quadrado, o que reitera a dependência entre as duas variáveis.

Ademais, a Figura 10 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão versus a absorção por capilaridade. Ambas as medidas de absorção estão diretamente relacionadas e, de acordo com a Figura 10, uma alta dependência pode ser identificada entre elas, consolidando a influência de ambas as propriedades na absorção e percolação de água na microestrutura do concreto.

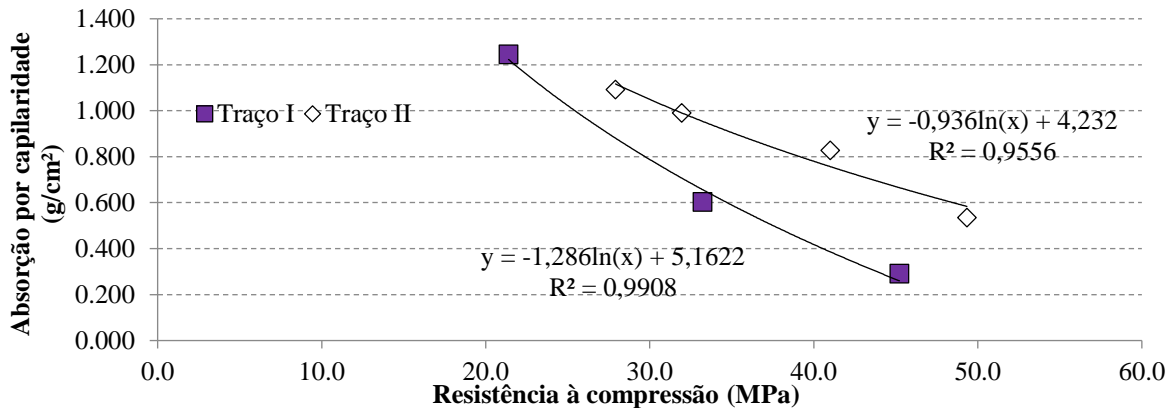


Figura 9. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade.

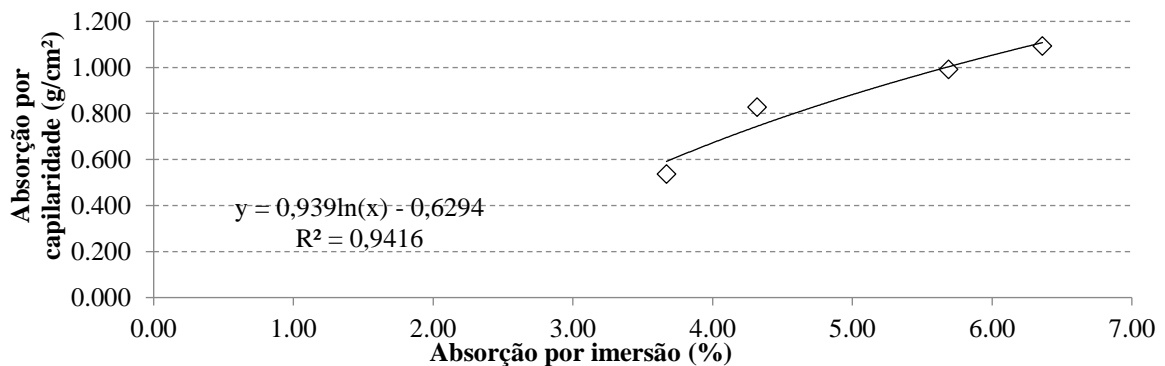


Figura 10. Correlação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Por fim, a Tabela 5 resume todas as equações de tendência logarítmica obtidas com as correlações. De acordo com a Tabela 5, a maioria dos coeficientes R-quadrado encontrados foi maior que 0,900. Isso é consequência da dependência entre todos os parâmetros estudados (resistividade elétrica, resistência à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade) e a porosidade do material, embora essa correlação não seja exclusiva. No entanto, as equações na Tabela 5 devem ser extrapoladas com muita cautela, pois são válidas inicialmente apenas para os materiais e considerações adotadas nesta pesquisa. Não obstante, o estudo da validação dessas equações, bem como outros materiais, é altamente encorajado.

Tabela 5. Equações de correlação dos parâmetros avaliados.

Parâmetros	Equação	Traço	R ²
Resistência à compressão (f_c) e Resistividade elétrica (p)	$f_c = 35,49\ln(p)-29,29$	I	0,983
	$f_c = 40,97\ln(p)-60,65$	II	0,987
Absorção por imersão (A_i) e Resistividade elétrica (p)	$A_i = -5,13\ln(p)+17,32$	II	0,935
Absorção por imersão (A_i) e Resistência à compressão (f_c)	$A_i = -4,83\ln(f_c)+22,41$	II	0,993
Absorção por capilaridade (A_c) e Resistividade elétrica (p)	$A_c = -1,38\ln(p)+3,15$	I	0,895
	$A_c = -1,05\ln(p)+3,38$	II	0,998
Absorção por capilaridade (A_c) e Resistência à compressão (f_c)	$A_c = -1,29\ln(f_c)+5,16$	I	0,991
	$A_c = -0,94\ln(f_c)+4,23$	II	0,956
Absorção por capilaridade (A_c) e Absorção por imersão (A_i)	$A_c = 0,94\ln(A_i)-0,63$	II	0,942

4. CONCLUSÃO

As seguintes conclusões foram obtidas com o desenvolvimento deste estudo:

- Existe uma relação de dependência entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica, que foi comprovada pelo coeficiente R-quadrado acima de 0,98 em ambos os traços. Assim, a resistividade elétrica e a resistência à compressão do concreto tendem a crescer juntas, ao menos até a idade investigada neste artigo.
- A absorção de água por imersão foi inversamente proporcional à resistência à compressão e à resistividade elétrica do concreto. Além disso, a absorção por imersão foi diretamente proporcional à relação água/cimento.
- O mesmo comportamento pode ser observado na absorção de água por capilaridade. Coeficientes de correlação superiores a 0,89 foram observados nesse caso.
- Concretos com maior teor de pozolana apresentaram maior resistividade e absorção por capilaridade, para relações água/cimento menores que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução dos diâmetros dos poros e à densificação da microestrutura. No entanto, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade para relação água/cimento de 0,60, devido à menor tortuosidade dos poros.
- Ficou provado que a correlação entre os parâmetros deve ser utilizada separadamente para cada tipo de cimento com diferentes teores de pozolana, uma vez que as curvas de correlação foram construídas para cada um dos dois tipos de cimento utilizados nesse artigo. A única exceção foi a correlação entre a absorção e a relação água/cimento, que permitiu um ajuste entre os dois traços como um único grupo (R-quadrado = 0,89).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo seu apoio à infraestrutura para o desenvolvimento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Benboudjema, F., Burlion, N., Capra, B., Carcasses, M., Colliat, J. B., Cussigh, F., Deby, F., Jacquemot, F., Larrard, T., Lataste, J. F., Bescop, P. L., Pierre, M., Poyet, S., Rougeau, P., Rougelot, T., Sellier, A., Yanez-Godoy, H. (2013), *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties*. Cement and Concrete Research. 45:21-36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.11.002>
- Andrade, C., D'andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*, Revista ALCONPAT, 1(2), 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Asociación Española de Normalización (2014). *UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*. Madrid.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 9778: Argamassa/concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Bem, D. H., Lima, D. P. B., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of chemical admixtures on concrete's electrical resistivity*. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 36(2):174-187. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2017-0058>
- Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high performance concretes*. Ingeniería de Construcción. 31(2):91-104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>
- Chen, C. T., Chang, J. J., Yeh, W. C. (2014), *The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete*. Construction and Building Materials. 71:35-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>
- Comité Euro-International du Béton. (1989). *CEB Bull 192: Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report*. Lausanne.
- Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. (2007), *Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes*. Cement and Concrete Composites. 29(2):136-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.005>
- Gans, P. S. (2017), *“Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à Compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e Secagem com cloretos e sulfatos”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Hoppe Filho, J., Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P., Isaia, G. C. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(3):411-418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596)

- Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review*. Cement and Concrete Composites. 39:60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M. P. (2016), *Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume*. Construction and Building Materials. 113:369-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071>
- López, M., Castro, J. T. (2010), *Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo*. Ingeniería de Construcción, 25(3):419-431. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300006>
- Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., Siqueira, H. C. (2012), *Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*. Cement and Concrete Composites. 34(3):392-399. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>
- Medeiros, M. H. F., Raisdorfer, J. W., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. A. (2017), *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2(4):1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G. (2016), *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. Construction and Building Materials. 107:11-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., Real, L. V. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, 4(2), 113-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2006), *“Concrete – Microstructure, Properties and Materials”*. McGraw Hill, New York City, United States, cap. 5, pp. 121-198.
- Olsson, N., Baroghel-Bouny, V., Nilsson, L. O., Thiery, M. (2013), *Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements*. Cement and Concrete Composites. 40:40-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001>
- Pinto, S. R., Macedo, A. L. A., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 3(3):1-10. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>
- Presuel-Moreno, F., Wu, Y. Y., Liu, Y. (2013), *Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time*. Construction and Building Materials. 48:874-882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.094>
- Ramezaniyanpour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F. (2011), *Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength*. Construction and Building Materials. 25(5):2472-2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- Sabbag, N., Uyanik, O. (2018), *Determination of the reinforced concrete strength by electrical resistivity depending on the curing conditions*. Journal of Applied Geophysics. 155:13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>
- Sengul, O. (2014), *Use of electrical resistivity as an indicator for durability*. Construction and Building Materials. 73:434-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011). *“Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure”* in: Freitas, V. P., Corvacho, H., Lacasse, M. (Eds.), XII International Conference on Durability of Building Materials and Components, FEUP Edições, Porto: Distrito de Porto (PT), 8 p.
- Wei, X., Xao, L. (2014), *Kinetics parameters of cement hydration by electrical resistivity measurement and calorimetry*. Advances in Cement Research. 26(4):187-193. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00034>

- Ye, H., Jin, N., Jin, X. (2017), *An Experimental Study on Relationship among Water Sorptivity, Pore Characteristics, and Salt Concentration in Concrete*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 61:530-540. <https://doi.org/10.3311/PPci.9621>
- Yildirim, H., Ilica, T., Sengul, O. (2011), *Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration*. Construction and Building Materials. 25(3):1282-1288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023>
- Yu, B., Liu, J., Chen, Z. (2017), *Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity*. Construction and Building Materials. 138:101-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100>
- Zhang, S. P., Zong, L. (2014), *Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials*. Advances in Materials Science and Engineering. 2014:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/650373>

Estudo do comportamento eletroquímico da solda de aço ASTM A 615 com aço inoxidável AISI 304 utilizando eletrodo tipo Inconel 182

J. C. I Ramirez –Soto^{1*} , J. T. Pérez-Quiroz² , J. M. Salgado-López³ , M. Martínez-Madrid² , T. Pérez-López¹ , M. Rendón-Belmonte² , E. Alvarez-Alfaro⁴ 

* Autor de Contato: autor.contacto@email.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepção: 16/07/2018 | Aceitação: 04/03/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho contra a corrosão de juntas soldadas de metais dissimilares, estudando a união aço carbono ASTM A 615 com aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 como metais básicos, e como metal de enchimento eletrodo ER-309L, utilizando nos metais base, bisel único de 45 °. Metade dos corpos-de-prova foram submetidos a um processo com eletrodo fundido tipo Inconel 182. Os resultados eletroquímicos mostram que, apesar dos defeitos apresentados na fusão do eletrodo, eles formam capa passiva em meio alcalino. Os corpos de prova fundido na união com eletrodo tipo Inconel 182, apresentaram maior resistência à corrosão e melhor comportamento mecânico.

Palavras-chave: corrosão; soldagem dissimilar; infraestrutura.

Citar como: Ramirez –Soto, J. C. I., Pérez-Quiroz, J. T., Salgado-López, J. M., Martínez-Madrid, M., Pérez-López, T., Rendón-Belmonte, M., Alvarez-Alfaro, E. (2019), “Estudo do comportamento eletroquímico da solda de aço ASTM A 615 com aço inoxidável AISI 304 utilizando eletrodo tipo Inconel 182”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 167 – 184, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.334>

¹ Centro de Investigaciones en Corrosión, México.

² Instituto Mexicano del Transporte, México.

³ Tecnología de Materiales, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Electrochemical behavior of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 with and without buttering using Inconel 182

ABSTRACT

In this study, the corrosion performance of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 stainless steel with and without buttering using Inconel 182 was evaluated. In both cases, the filler metal was ER-309L and the base metals were prepared with a 45° single bevel. One half of the specimens were welded with “buttering” using Inconel 182. The electrochemical results showed that despite welding defects, the welded specimens formed a passive layer in alkaline environments. The specimens welded with buttering exhibited the best corrosion resistance and mechanical properties.

Keywords: corrosion; dissimilar welding; infrastructure.

Comportamiento electroquímico de uniones disímiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantequillado con Inconel 182 y sin enmantequillado

RESUMEN

Este trabajo evaluó el desempeño frente a la corrosión de uniones soldadas disímiles, utilizando como metales base acero al carbono ASTM A 615 y acero inoxidable austenítico AISI 304, y como metal de aporte electrodo ER-309L, se utilizó bisel simple a 45°. La mitad de los especímenes fueron sometidos a un proceso de “mantequillado” utilizando electrodo Inconel 182. Los resultados electroquímicos muestran que, a pesar de los defectos presentados en la unión soldada, estas tienden a pasivarse en medio alcalino, siendo las probetas con mantequillado las menos deterioradas por efecto de la corrosión y su resistencia mecánica no se ve minimizada.

Palabras clave: corrosión; soldadura disímil; infraestructura.

1. INTRODUÇÃO

O material mais comum na construção é o concreto armado, cujas propriedades mecânicas e químicas são importantes para a confiabilidade. No entanto, o comprometimento de estruturas de concreto, em geral está associado à corrosão nas armaduras, e isso tem sido relatado na literatura (Pérez, 2009). A maioria das pontes e píers no México foram construídas usando concreto armado com aço carbono. Uma exceção é o píer em Progreso, Yucatán e algumas seções do píer em Coatzacoalcos, Veracruz. O primeiro utiliza aço inoxidável como armadura e o segundo, aço galvanizado. Esta informação indica que a resistência contra ambientes agressivos é limitada (especialmente no caso de ambientes com íons cloreto e dióxido de carbono). Tradicionalmente, diferentes tipos de métodos são aplicados para neutralizar os danos causados pela corrosão em estruturas de concreto. Esses métodos podem ser classificados em quatro categorias com base no mecanismo de proteção (Kepler, 2000):

- **Modificação da matriz de concreto**

Relação água / cimento; Adicionando materiais cimentícios

- **Métodos de Barreira**

Revestimentos poliméricos; Pinturas; Revestimentos metálicos

- **Métodos eletroquímicos**

Proteção catódica por corrente impressa (ICCP) ou ânodos galvânicos (CPGA); Inibidores de corrosão; Extração eletroquímica de íons cloreto; Re-alcalinização eletroquímica.

● **Reabilitação de estruturas de concreto com novos materiais.**

Materiais compósitos, aço inoxidável.

As técnicas de reabilitação e renovação são muitas e diversas; algumas são aplicadas ao aço, outras no concreto e outras em ambos os materiais (Gonzalez 2010). A preservação da infraestrutura é vital tanto em termos econômicos quanto sociais, porque fornece segurança e apoio o desenvolvimento social. No entanto, as estruturas de concreto corroem e devem ser reparadas após 10, 20 ou 30 anos de serviço, porque as conseqüências afetam não apenas a integridade estrutural, mas também a estética, a imagem institucional e até segurança humana. Além disso, a corrosão reduz a funcionalidade e o valor de uma estrutura, levando a grandes despesas financeiras necessárias para reparar, reformar ou substituir a infraestrutura corroída. Devido a estas razões, existe a necessidade de se desenvolver processos para o controle e prevenção da corrosão em barras de aço de armadura embutidas em estruturas de concreto (Rougier, 2010; Terradillos, 2008). Dessa forma, armaduras de aço inoxidável para estruturas de concreto representam uma opção atrativa que vem sendo proposta há vários anos para aumentar a resistência do concreto em ambientes agressivos (BSSA, 2003; Medina, 2013).

Muitos pesquisadores, por exemplo Brown (1976), Treadaway (1989), Sorensen (1990), Nurnberger (1996) McDonald (1998), Pedferri (1997), Bertolini (1998) e Baltazar (2007), realizaram estudos para avaliar o comportamento do aço inoxidável como armadura para estruturas de concreto. Por outro lado, Lundin (1982), Doddy (1992), Ospina (2007), García (2011) e Pérez-Quiroz (2016) pesquisaram as propriedades metalúrgicas e mecânicas de juntas soldadas dissimilares, e seus resultados demonstraram que a aplicação dessas juntas é viável para a reabilitação de estruturas de concreto. Considerando que o aço inoxidável é mais caro que o aço carbono, as armaduras de carbono e aço inoxidável podem ser unidas por conectores ou juntas de solda para melhorar a resistência à corrosão de uma estrutura de concreto e reduzir custos.

Perez Quiroz (2016) apontou que, para evitar a difusão de carbono no aço inoxidável e minimizar o risco de danos devido à corrosão durante a soldagem, o uso de fusão tipo o eletrodo Inconel 182 é uma boa opção. Assim, é desejável investigar a metalurgia de juntas soldadas dissimilares e o comportamento de corrosão de tais uniões soldadas. Atualmente, existem poucos estudos que avaliam o comportamento de corrosão das juntas entre o carbono e o aço inoxidável com e sem fusão usando Inconel. Portanto, neste trabalho foi testada a resistência à corrosão de juntas soldadas entre barras de aço carbono e inox com e sem fusão de eletrodo Inconel 182 para avaliar esta metodologia de reabilitação de estruturas de concreto de pilares marítimos (Fig. 1).

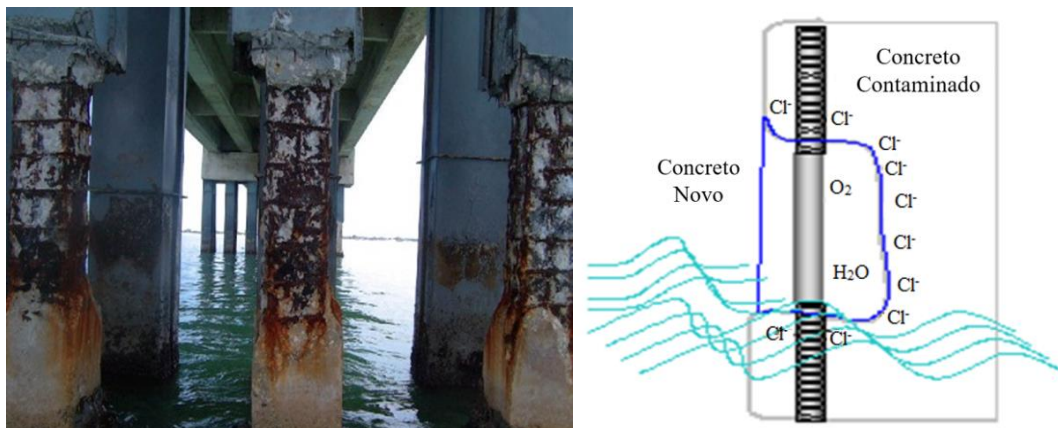


Figura 1. Reparo de estruturas de concreto usando aço inoxidável proposto por Pérez Quiroz, (2009)

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais e processos aplicados neste projeto foram selecionados sob dois critérios: custo da(s) junta(s) e viabilidade para aplicação em campo do processo de soldagem e eletrodos. A Tabela 1 lista os materiais, equipamentos e produtos químicos que foram usados nesta pesquisa, e a Tabela 2 fornece as composições químicas dos metais de base, do eletrodo 309L e do metal de enchimento Inconel.

Tabela 1. Materiais, equipamentos e soluções químicas.

Materiais	Equipamento	Soluções Químicas
barras de armadura ASTM A615 barras de armadura AISI 304 Eletrodo ER 309L Eletrodo Inconel 182	Máquina de corte Máquina de corte automática de disco Máquina de torno convencional Fresadora convencional Castolin Eutectic, Master NT2000 máquina de solda AC/DC Máquina de eletro-descarga Moagem de disco duplo Máquina de polir disco duplo Aquecedor magnético Multímetro Fluke Equipamento Gamry interface1000 Eletrodo de referência Ag/AgCl	3.5% em massa de solução de cloreto de sódio (NaCl) (água do mar). Solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH) ₂

Tabela 2. Composições químicas de metais básicos, eletrodo 309L e metal de enchimento Inconel.

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Fe
ASTM A 615	0.24	0.18	0.77	0.03	0.03	0.08	0.04	0.07	0.01	0.01	0.23	98.3
AISI 304	0.01	0.33	1.39	0.07	0.03	18.1	0.27	8.61	0.01	0.18	0.38	74.1
Elemento	C		Mg		Si		Cr		Ni		Fe	
Composição 309L (%)	0.03		1.92		0.80		23.8		13.3		Balanço	
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Fe	Ti		
Composição Inconel (%)	<0.1	<1	5-9.5	<0.03	<0.015	13-17	>59	1-2.5	<10	<1		

A identificação das amostras foi feita conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Designações de amostras de ensaio.

Designação	Tipo de amostra
A.C. SW	Aço carbono ASTM A615 em solução de NaCl a 3,5% em peso
A.I. SW	Aço inoxidável AISI 304 em solução NaCl a 3,5% em peso
A.C. HC	Aço carbono ASTM A615 em hidróxido de cálcio
A.I. HC	Aço inoxidável AISI 304 em hidróxido de cálcio
junta soldada dissimilar BsAM1	Junta em bisel única sem fusão exposta à solução de 3,5% em peso de NaCl
junta soldada dissimilar BcAM2	Bisel único com fusão do Inconel 182, exposto à solução de 3,5% em peso de NaCl
junta soldada dissimilar BsHC1	Junta de bisel única sem fusão de Inconel 182, exposto à solução de hidróxido de cálcio
junta soldada dissimilar BcHC2	Junta cônica única com fusão, exposta à solução de hidróxido de cálcio

As amostras foram constituídas de barras de aço carbono e inox com as seguintes dimensões: 1,9 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Fig. 2). O bisel da junta foi preparado a 45°, de acordo com NMX-H-121-1988 e ANSI / AWS D1.4-M 2005. O processo de soldagem para as juntas foi Soldagem por Arco Metálico Blindado (SMAW), porque este processo é o mais utilizado na soldagem, em canteiro, de armaduras.

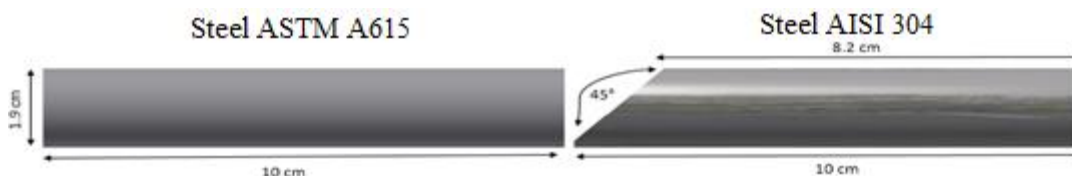


Figura 2. Diagrama de uma junta soldada com um único bisel a 45°.

O metal de adição aplicado para as juntas soldadas foi o aço inoxidável AISI 309L. No caso da soldagem com fusão, o eletrodo era Inconel 182. Esta etapa consistiu em aplicar uma camada de 2 mm de espessura na superfície frontal da barra AISI 304. A máquina de solda foi um Eutectic Castolin, Master NT2000 AC / DC e os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem.

Diâmetro da barra (mm)	19
Diâmetro do eletrodo (mm)	3.2
Potencial elétrico (V)	22
Intensidade de soldagem (A) DC-PI	90-95
Velocidade de soldagem (mm/min)	45
Entrada de calor (kJ/mm)	2.5

Após a soldagem, as amostras foram cortadas longitudinal e transversalmente com uma máquina de descarga elétrica ACTSPARK. As amostras foram montadas em epóxi e depois preparadas para metalografia de acordo com ASTM E 3. Antes do polimento, o metal base de aço inoxidável de

cada amostra foi perfurado para introduzir um fio de cobre para obter o contato elétrico necessário para o ensaio eletroquímico. O comportamento de corrosão da junta dissimilar soldada foi avaliado com um potenciostato Gamry Interface 1000 (Fig. 3) aplicando as seguintes técnicas eletroquímicas: medida do potencial de corrosão de acordo com ASTM C 876; ensaio de resistência de polarização linear de acordo com ASTM G 59, e medição de ruído eletroquímico conforme com ASTM G 199.

Resistência de Polarização Linear (LPR)

Esta técnica consiste em medir a relação entre o potencial e a densidade de corrente em regime permanente, excitando o sistema pela aplicação de sinais de corrente contínua. Para a realização do ensaio de Rpl, utilizou-se uma célula de três eletrodos: a referência (Ag / AgCl), um eletrodo auxiliar (grafite), e o eletrodo de trabalho foi uma amostra de CA/SS. Os eletrodos mencionados foram colocados na célula e o ensaio de Rpl foi realizado usando o potenciostato Gamry interface1000 com as seguintes configurações: varredura de +/- 20 mV com uma taxa de varredura de 10 mV / min, de acordo com ASTM G 59.

Ruído Eletroquímico (EN)

O ruído eletroquímico é uma técnica que mede as flutuações espontâneas do potencial e da corrente em sistemas eletroquímicos, que são de baixa frequência (<10 Hz) e amplitude. O ruído eletroquímico origina-se, em parte, de variações naturais na cinética eletroquímica durante um processo de corrosão. Frequentemente, o EN é considerado e analisado como um fenômeno aleatório (estocástico) acoplado à cinética determinística.

A técnica EN foi realizada com a ajuda de um potenciostato Gamry Interface 1000. Este equipamento é capaz de medir em tempo real os fenômenos de redução de óxidos que ocorrem nos eletrodos. O número de leituras por peça de ensaio foi 2048, com tempo de estabilização de 10 s; o tempo de ensaio foi de 45 min. Este ensaio requer três eletrodos, dois idênticos, que consistem em prata / cloreto de prata Ag/AgCl, e um de referência.

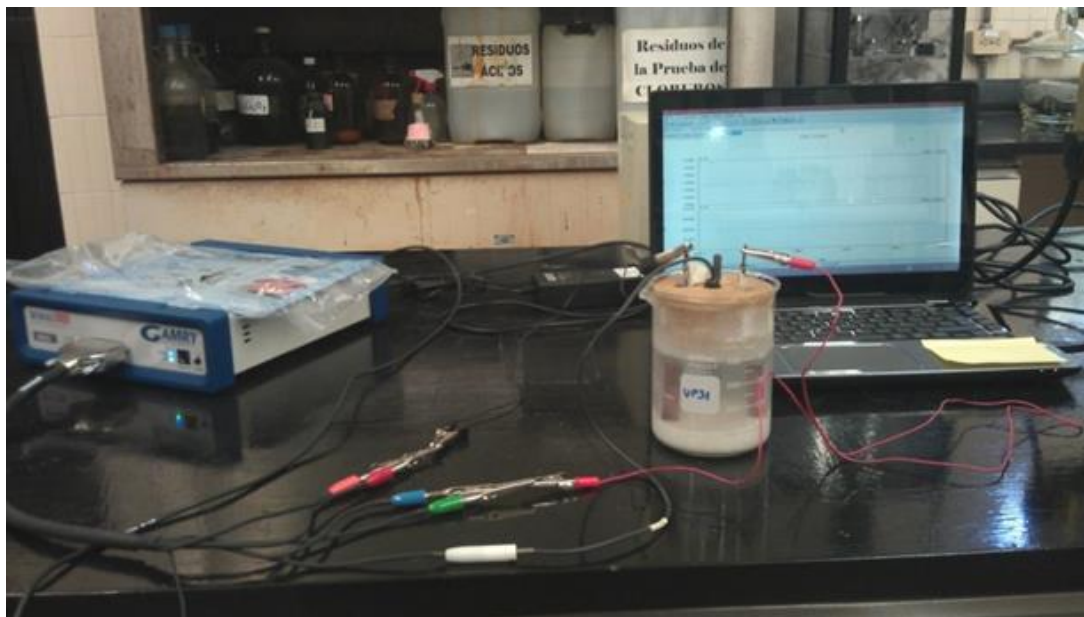


Figura 3. Configuração de célula eletroquímica para ensaios de corrosão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes do ensaio eletroquímico, as amostras foram observadas usando um microscópio estereoscópico, e foram observadas fissuras nas amostras onde foi realizada a aplicação de eletrodo fundido (Fig. 4); essas fissuras (aproximadamente 2 mm de comprimento) estão associadas a fissuras a quente devido ao teor de níquel no Inconel 182 utilizado para o revestimento. Lembra-se que a fusão é aplicada a juntas soldadas dissimilares para evitar a difusão do carbono, a separação de fases e a precipitação de carbonetos de cromo, pois esses fenômenos influenciam o comportamento da corrosão no aço inoxidável. Os resultados coincidem com os de Evans (1962), que relataram que as ligas de níquel soldadas ao aço inoxidável são suscetíveis a fissuras a quente. As macrografias da Fig. 4 mostram alguma falta de fusão próxima à interface do aço carbono/metal de enchimento. Tais defeitos não devem influenciar o comportamento de corrosão da junta soldada, porque eles estão localizados no interior do metal, mas se o eletrólito entrar em contato com eles, eles se tornariam um ânodo e permitiriam corrosão localizada. Por outro lado, eles têm um forte impacto nas propriedades mecânicas porque atuam como descontinuidades concentradoras de tensões.

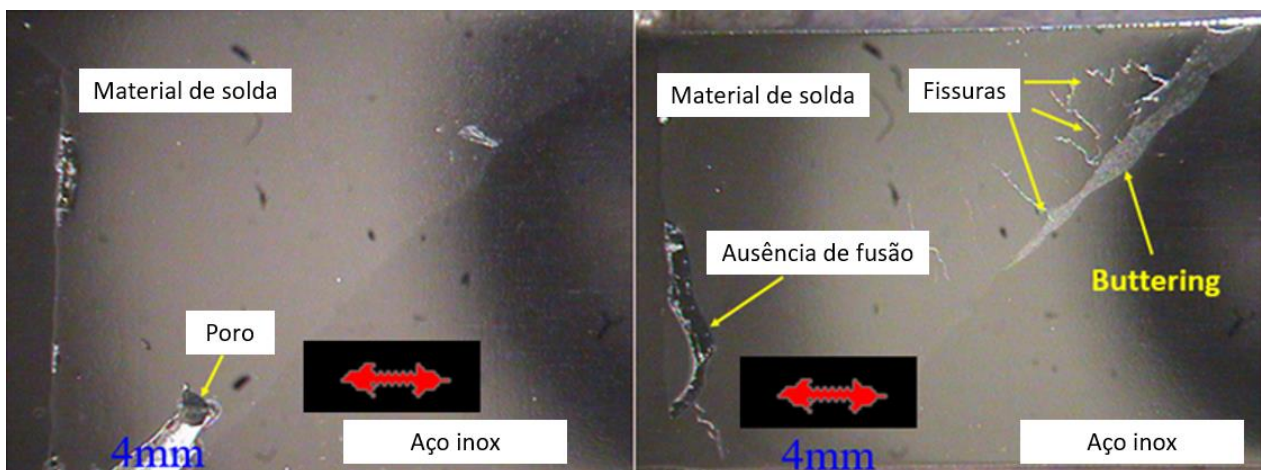


Figura 4. Amostras com aumento de 7x mostrando fissuras e falta de fusão das juntas soldadas dissimilares.

3.1 Potencial de Corrosão (Ecorr)

Na Fig. 5 são mostrados os resultados do potencial de corrosão dos metais de base. As medidas foram realizadas durante 14 dias para amostras imersas em NaCl e Ca(OH)₂. Na Fig. 5, os valores mais negativos ocorrem para o aço carbono em solução salina (A.C.), que simula a água do mar. Tais resultados indicam uma alta probabilidade de corrosão de acordo com a norma ASTM C 876 (2015). Sistonen (2002) indicou que tais valores representam um grave risco de corrosão. No caso do aço inoxidável (A.I.), os resultados do potencial de corrosão são mais positivos do que para o aço carbono na mesma solução e de acordo com a ASTM C876 (2015), os resultados estão dentro da zona de incerteza. Tais resultados podem ser explicados pela camada passiva de cromita no aço inoxidável, que protege o material até certo ponto. Sistonen (2002) sugeriu que o potencial de corrosão deve ser interpretado com base nos critérios mostrados na Tabela 5.

No caso da solução de Ca(OH)₂, os resultados do potencial de corrosão para ambos os materiais base são mais positivos do que na água do mar devido à alcalinidade da solução de Ca(OH)₂, segundo a norma ASTM C 876 (2015). A mesma norma menciona que a probabilidade de dano do aço carbono nesses ambientes é mínima. Com base nos critérios de Sistonen (2002), ambos os aços estão na categoria de risco médio de corrosão.

Tabela 5. Critérios para o potencial de corrosão de aço carbono e aço inoxidável (Sistonen, 2002).

Condição de corrosão	Barra de aço carbono mV vs CSE	Barra de aço inoxidável mV vs CSE
Risco de baixa corrosão, cerca de 10%	> - 200	> - 100
Risco Médio de Corrosão	- 200 a - 350	- 100 a -250
Alto risco de corrosão <90%	- 350 a - 500	-250 a - 400
Risco de corrosão severa	< - 500	< - 400

A Fig. 6 mostra a relação entre o potencial de corrosão e o tempo para juntas soldadas de chanfro simples em solução de NaCl a 3,5% em peso. Os valores estão dentro da faixa de corrosão de alta probabilidade de acordo com a ASTM C 876 (2015), mas de acordo com Sistonen (2002), eles estão dentro da faixa de risco de corrosão severa. Observe que a variação do potencial de corrosão da amostra BsAM2 foi causada por erro experimental, embora a tendência siga as outras amostras, onde o risco de corrosão é alto.

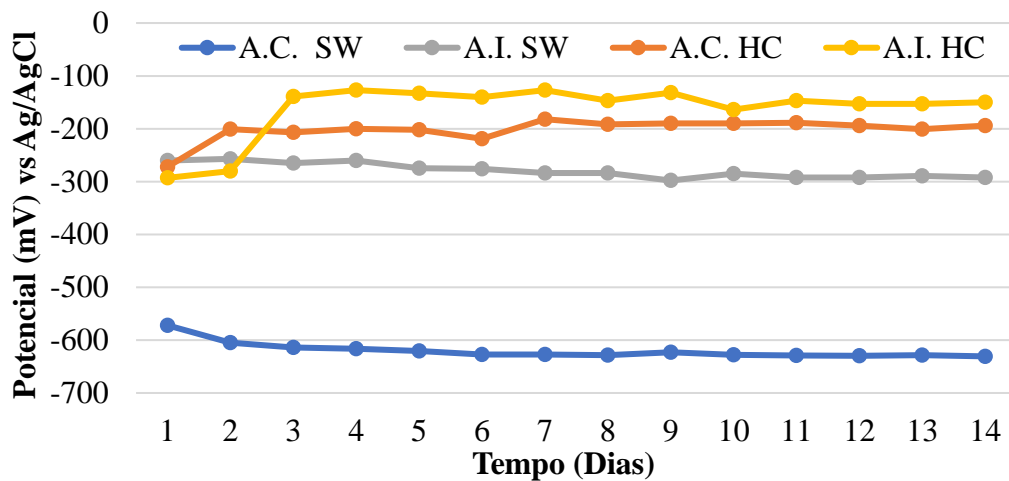


Figura 5. Potencial de corrosão dos metais base na água do mar e hidróxido de cálcio.

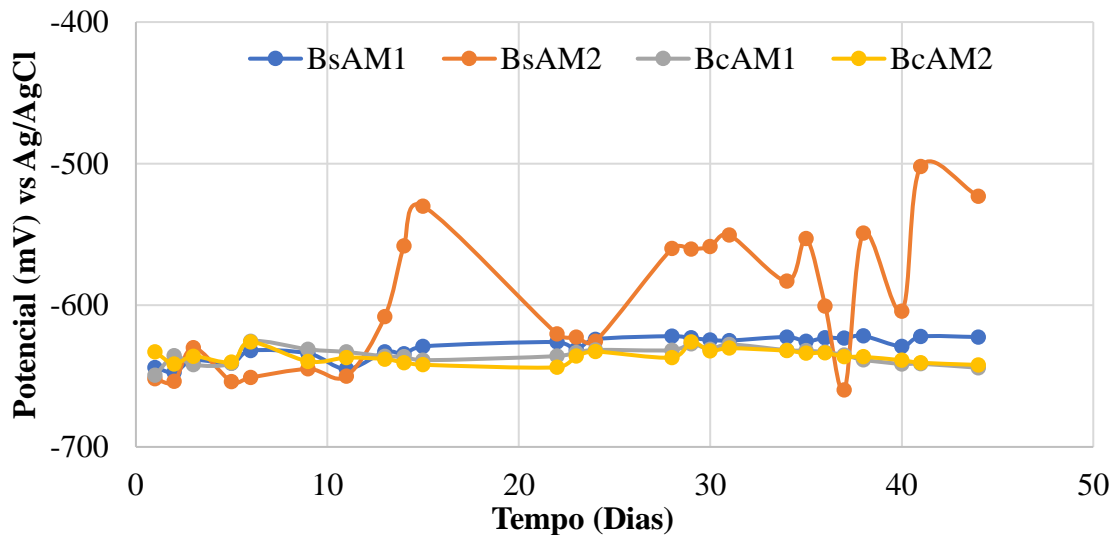


Figura 6. Potencial de corrosão x tempo em juntas soldadas de bisel único na água do mar.

Comparando a Fig. 5 com a Fig. 6, não é fácil detectar qualquer efeito do processo de fusão sobre o potencial de corrosão. No entanto, tal comparação indica que o potencial de corrosão de uma junta inteira caiu para valores mais negativos, que são muito semelhantes aos valores de aço carbono imersos na água do mar. Esses resultados indicam maior suscetibilidade à corrosão.

Com relação às amostras nas soluções de cloreto de sódio (NaCl) e hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a tendência dos valores de potencial de corrosão em relação ao tempo está entre -0.500 V a -0.670 V vs. Ag / AgCl, porque o metal mais ativo é o aço carbono (Figura 5) de acordo com ASTM G 82. Como o potencial de corrosão do aço carbono é, aproximadamente -0.600 V, e o potencial do aço inoxidável é -0.300 V. Ag / AgCl (Fig. 5) os valores potenciais mostrados na Fig. 6 em relação à ASTM C876 indicam que existe uma probabilidade de 90% de corrosão, porque são mais negativos do que -0,350 V Ag / AgCl. A Fig. 6 também mostra que o valor do potencial de corrosão está na faixa de -0.500 V a -0.650 V Ag / AgCl.

Amostras com maior número de defeitos (poros, fissuras, etc.) foram selecionadas para ensaios em hidróxido de cálcio para investigar se geraram uma camada passiva, o que reduz a taxa de corrosão. A Fig. 7 mostra os resultados, indicando que após 15 dias, os valores estão na faixa provável de corrosão de acordo com ASTM C 876 (2015) e Sistonen (2002). No entanto, após 20 dias, os potenciais de corrosão mudaram para valores mais positivos. Estes resultados indicam que o processo de corrosão ocorreu durante os primeiros 14 dias, após que uma camada passiva compacta e aderente foi formada na superfície das amostras devido à alcalinidade do ambiente, de acordo com ASTM C 876 (2015) e Sistonen (2002). Assim, com base nesses critérios, outros danos por corrosão em aço carbono, aço inoxidável e juntas soldadas devem ser mínimos. Note que para este ensaio, amostras com um maior número de defeitos foram selecionadas (com e sem fusão de eletrodo). Assim, os resultados sugerem que em ambiente alcalino os danos por corrosão seriam mínimos.

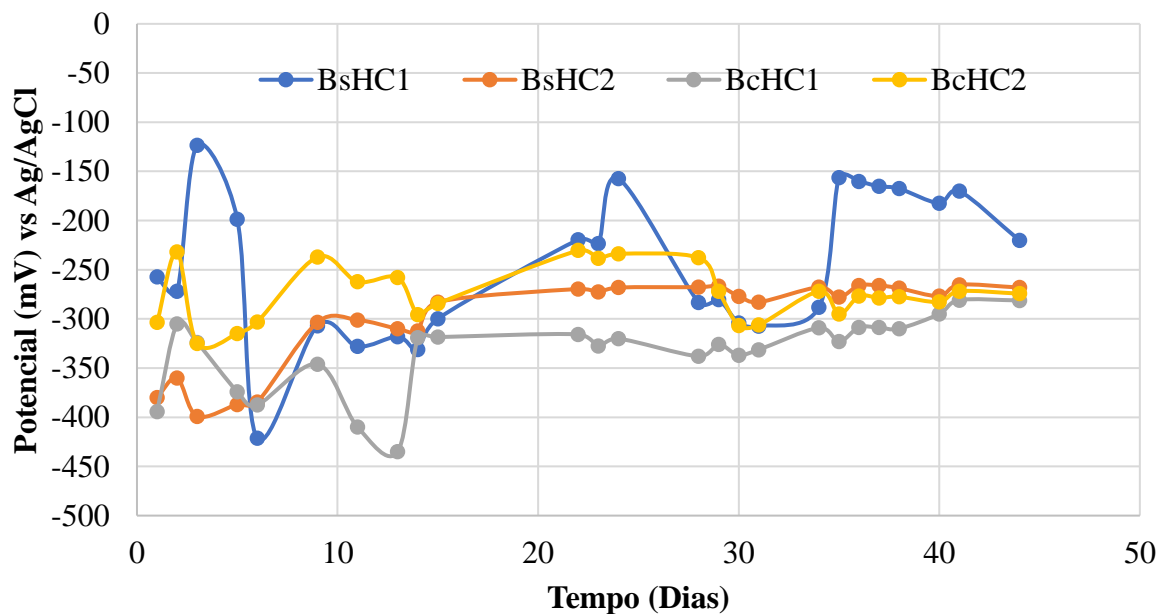


Figura 7. Potencial vs tempo para junta soldada de chanfro simples em hidróxido de cálcio

3.2 Medições da taxa de corrosão com base na resistência à polarização.

A Fig. 8 mostra as taxas de corrosão para as amostras imersas na água do mar, onde todas as taxas estão na faixa entre 0,15 a 0,25 mm/ano. Os valores são 10 vezes superiores às recomendações feitas pelo grupo DURAR (1997). Assim, pode-se afirmar que a corrosão sob estas condições é inevitável para o material de base e o metal de enchimento. Como mencionado anteriormente, a

conexão elétrica da amostra BsAM2 foi perdida, indicando porque os valores dessa amostra são quase zero.

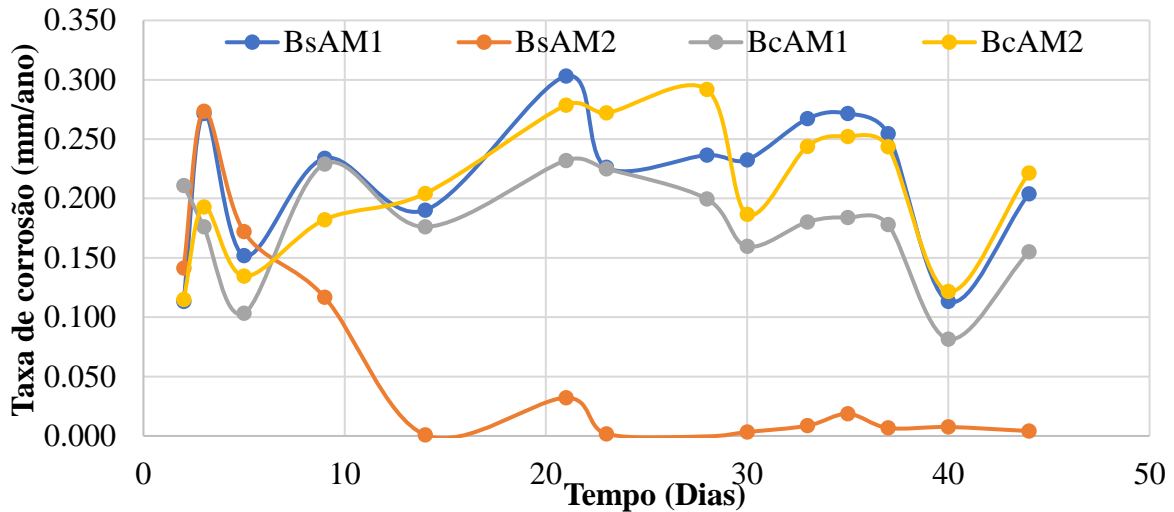


Figura 8. Taxa de corrosão de juntas soldadas de bisel único na água do mar.

A Fig. 9 mostra as alterações na taxa de corrosão do hidróxido de cálcio, que estão relacionadas ao início do processo de corrosão e à possível passivação das superfícies da amostra, devido ao meio alcalino no qual as amostras foram testadas

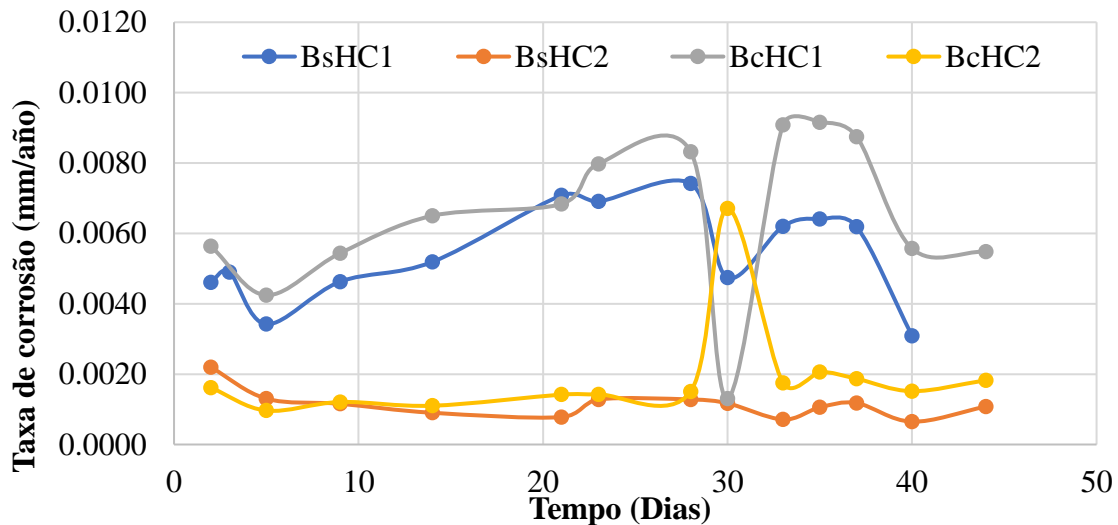


Figura 9. Taxas de corrosão de juntas soldadas de bisel único em hidróxido de cálcio.

A Fig. 9 mostra as taxas de corrosão das juntas soldadas imersas em uma solução de hidróxido de cálcio, que são muitas vezes menores que as taxas de corrosão na água do mar (ver Fig. 8). Como mencionado anteriormente, isso pode ser explicado pela formação da camada passiva devido ao ambiente alcalino da solução, mesmo com os defeitos de soldagem mostrados na Fig. 4. Esses fatos suportam o argumento de que o aço inoxidável é uma boa opção para substituir parcialmente o aço carbono em armaduras em estruturas de concreto, como mostrado na Fig. 1. Além disso, supondo que as barras de aço inoxidável estivessem embutidas em concreto novo, o material já estaria passivado e danos severos à corrosão não ocorreriam rapidamente. A afirmação anterior é justificada pelo diagrama de Pourbaix (1966), que indica que nas faixas alcalinas, o aço carbono é protegido por passivação.

Pesquisadores como Medina (2012), Bastidas (2014), Velasco (2013), Sanchez (2013), Bautista (2013), Acosta (2013), Landmann (2013), Andrade (1993) e González (1984) relataram bom desempenho do aço inoxidável, mesmo em ambientes salinos, porque o nível perigoso da taxa de corrosão para estruturas de concreto (100–125 mm / ano) é maior do que os resultados obtidos para o aço inoxidável. A Fig. 8 verifica se as taxas de corrosão das amostras são maiores do que a faixa recomendada de taxas, enquanto a Fig. 9 indica que as taxas de corrosão são substancialmente mais baixas do que aquelas faixas. Assim, reparos usando aço inoxidável satisfariam a especificação para um ambiente alcalino.

3.3 Medições da taxa de corrosão por ruído eletroquímico.

O efeito metalúrgico do comportamento de corrosão em juntas soldadas foi avaliado utilizando ruído eletroquímico. Essa técnica consiste em ajustar dois eletrodos em um eletrólito, conforme descrito no Capítulo 2 da ASTM C 199 e é mostrado na Fig. 3. Os resultados dessa técnica são mostrados nas Fig. 10–13. Duas variáveis caracterizam o comportamento de corrosão das amostras: resistência ao ruído (R_n), equivalente à resistência à polarização; e a segunda variável é o índice de localização (IL), que indica a forma de corrosão das amostras. Os seguintes critérios se aplicam: corrosão uniforme (0,001 a 0,01), mistura entre corrosão uniforme e localizada (0,01 a 0,1) e, finalmente, corrosão localizada (0,1 a 1). Esses critérios foram previamente considerados por Eden (1987), Kelly (1996), Mansfeld (1999) e Balan (2017).

A Fig. 10 mostra que os valores de IL das amostras de BsAM estão na faixa de corrosão localizada. Lembre-se de que essas amostras não tinham camada fundida e estavam imersas na água do mar. Portanto, a corrosão é esperada nessas amostras. A Fig. 11 mostra que os produtos de corrosão estão em pontos específicos das superfícies da amostra, conforme previsto pela norma ASTM G 199.

Embora os valores de IL das amostras de BcAM estejam na faixa de corrosão localizada, os produtos de corrosão são distribuídos uniformemente nas superfícies das amostras, o que está mais de acordo com o critério de corrosão uniforme. Isso sugere que a aplicação de fusão leva a uma corrosão mais uniforme. O consenso científico geral é que a corrosão uniforme é menos agressiva do que a corrosão por pite e em fresta, porque os últimos tipos de corrosão causam danos estruturais e podem levar a uma falha catastrófica.

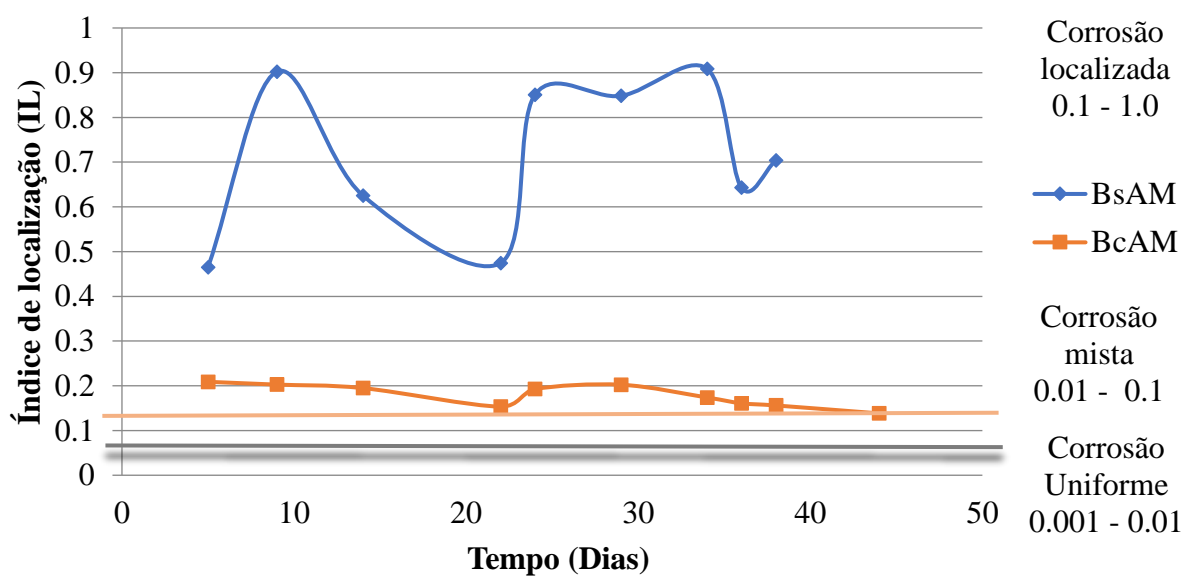


Figura 10. Resultados do ensaio de ruído eletroquímico de amostras de BsAM e BcAM na água do mar.

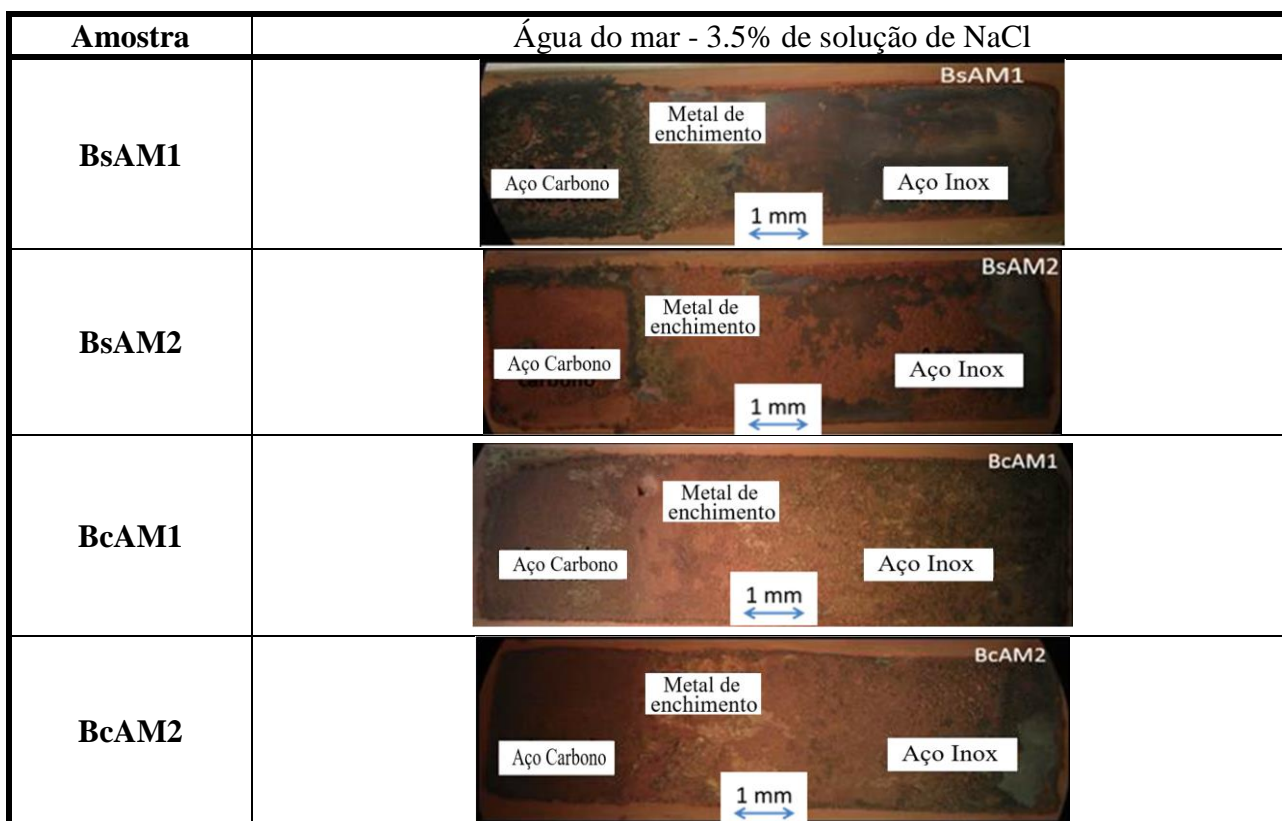


Figura 11. Imagens estereográficas de BsAM e BcAM testadas em água do mar (solução a 3,5% em peso de NaCl).

A Fig. 12 mostra os resultados das amostras testadas em hidróxido de cálcio. Esses resultados indicam que a corrosão localizada ocorre nos defeitos da junta soldada (como pode ser observado na Fig. 13), onde tal corrosão ocorre pela formação de células de corrosão por aeração diferencial. A amostra BsHC, que não continha defeitos de soldagem, exibiu uma camada branca na superfície da junta soldada (Fig. 13), que inibia a corrosão. Portanto, os únicos locais suscetíveis à corrosão localizada foram os defeitos de soldagem.

Neste caso, o comportamento da amostra BsCH está relacionado com o gráfico da Fig. 12. Esta amostra apresenta uma tendência de corrosão semelhante ao BcCH, porque os resultados de ambas as amostras estão na faixa de corrosão localizada. No entanto, no caso do BcHC, considera-se que a corrosão está associada a defeitos de soldagem, bem como à dissolução localizada da camada de níquel. Como explicado por Pourbaix (1966), o níquel corrói levemente em soluções alcalinas antes de formar uma camada passiva. O comportamento da amostra BcHc concorda com esta afirmação e explica as diferenças nos resultados entre as duas amostras.

A Fig. 13 mostra imagens estereográficas de amostras testadas em hidróxido de cálcio, as quais foram cobertas com uma camada de cor branca (depósito calcário), que forma uma camada passiva nas superfícies das amostras.

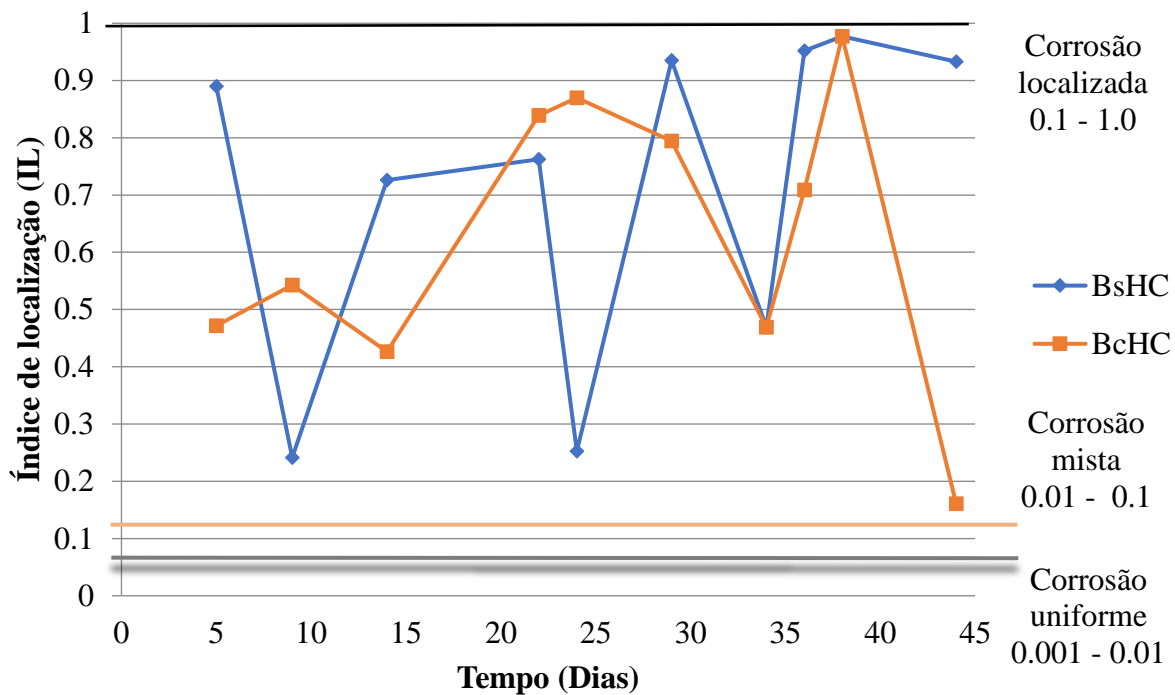


Figura 12. Gráfico dos valores de IL para as amostras BsHC e BcHC testadas em hidróxido de cálcio.

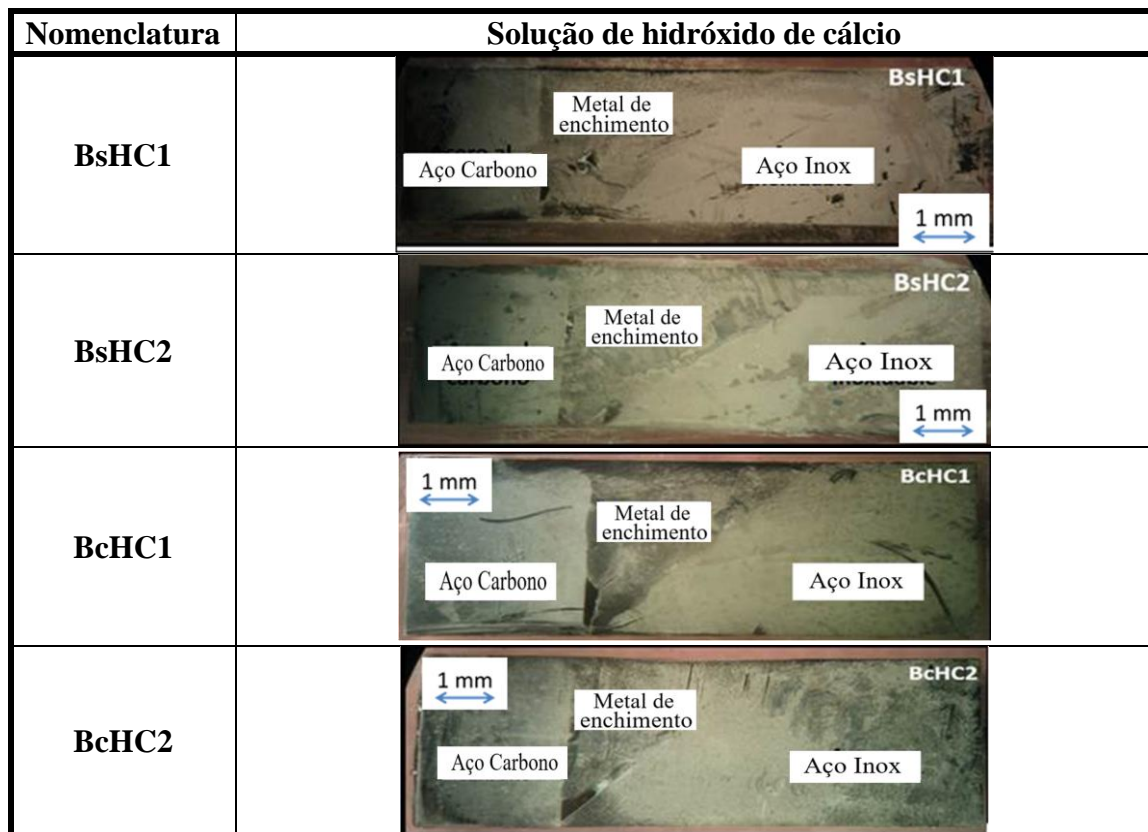


Figura 13. Superfícies de amostras de BsHC e BcHC após ensaio em hidróxido de cálcio.

O ruído de resistência (R_n) é uma ferramenta muito poderosa para avaliar a baixa taxa de corrosão das amostras de BsHC e BcHC imersas em hidróxido de cálcio, e é semelhante à resistência à

polarização. Portanto, essa técnica foi aplicada a essas amostras e os resultados são mostrados nas Fig. 14 e 15. O ASTM G 102 (2015) especifica a relação entre R_p e i_{corr} , que é inversamente proporcional. Em outras palavras, quanto maiores os valores de resistência a ruído, menor a densidade de corrente de corrosão, indicando uma menor taxa de corrosão. Amostras em água do mar (solução NaCl 3,5% em peso) apresentaram menores valores de resistência a ruídos do que as amostras na solução de $Ca(OH)_2$, portanto apresentaram maior densidade de corrente de corrosão, indicando maiores taxas de corrosão. As Fig. 14 e 15 destacam esses resultados. Os resultados concordam com os resultados relatados por Kelly (1996) e Garcia (2014).

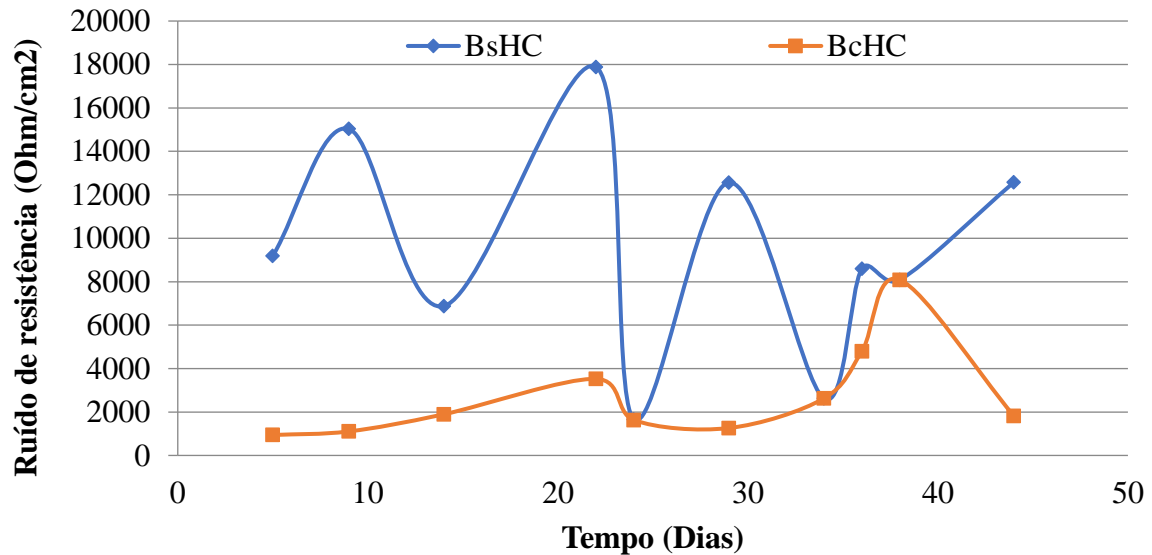


Figura 14. Resistência do ruído (R_n) das amostras de BsHC e BcHC ensaiadas em solução salina.

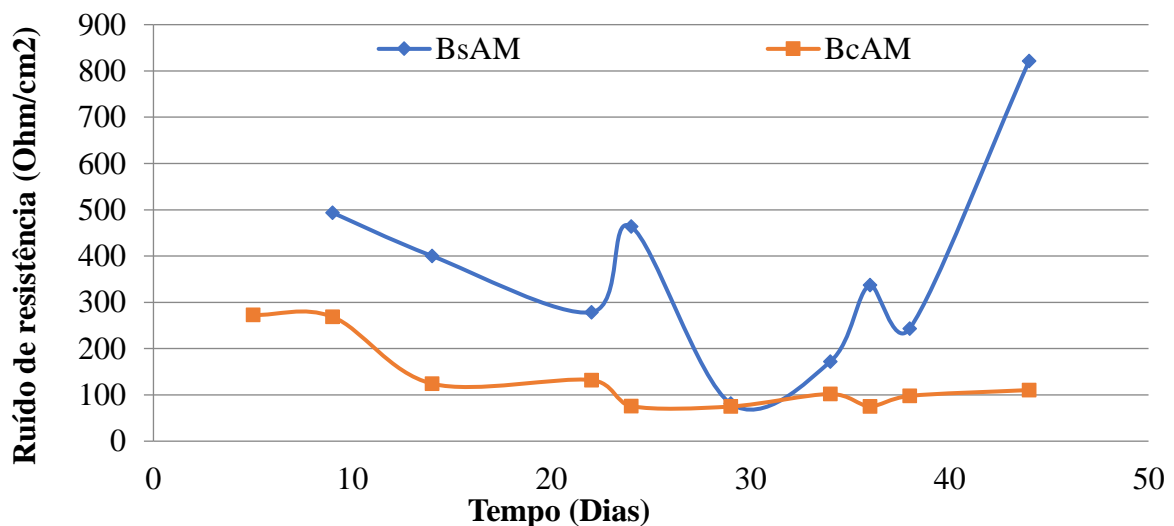


Figura 15. Valores de R_n para BsHC e BcHC ensaiados em hidróxido de cálcio.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho indicam que a reabilitação de estruturas de concreto usando aço inoxidável é viável, particularmente se o aço é passivado por um ambiente de entorno alcalino, ou

seja, por uma argamassa ou concreto “novo”. A construção ou reparo de uma estrutura de concreto deve ser realizada seguindo as normas aplicáveis, a fim de comprovar que a área reparada será passivada para reduzir o risco de corrosão futura.

Medições do potencial de corrosão foram úteis para determinar o comportamento de corrosão em dois ambientes diferentes para emendas de barras de aço carbono, com aço inoxidável e uma junta de metal dissimilar soldada entre os dois materiais com fusão de eletrodo tipo Inconel 182, comparativamente a juntas sem fusão de eletrodo. Descobriu-se que o aço carbono na água do mar é suscetível a corroer com 90% de probabilidade, enquanto o aço inoxidável está na faixa de incerteza. No entanto, resultados essencialmente opostos foram obtidos para um ambiente alcalino (solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), onde a probabilidade de corrosão foi de 10%.

Ambas as juntas de soldagem dissimilares com e sem o uso de eletrodo fundido resultaram em uma probabilidade de 90% de corrosão na água do mar, enquanto nos meios alcalinos a probabilidade de corrosão para qualquer junta diminuiu para 10%. Isso foi explicado por uma camada passiva encontrada nas superfícies das amostras.

A taxa de corrosão da junta soldada com eletrodo fundido foi menor em meio alcalino (solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) do que na água do mar (solução de NaCl 3,5% em peso). Esses resultados também foram explicados pela formação de uma camada passiva sobre os defeitos superficiais das amostras no ambiente alcalino.

Os resultados do ruído eletroquímico foram úteis para descrever o comportamento eletroquímico na solução alcalina e na água do mar de juntas soldadas com e sem fusão de eletrodo. Os resultados indicaram que o tipo de corrosão em tais amostras foi a corrosão uniforme, menos grave, e eles correspondem aos resultados obtidos por medidas de resistência à polarização e por potencial de corrosão.

5. REFERÊNCIAS

Acosta, P., Matres, V., Pachón, A., Sánchez, J., Fulla, J., Picón, J. M. (2013). “*Armaduras de acero inoxidable expuestas en ambiente marino. Caracterización in-situ de la corrosión*”. DM Bastidas, E. Medina Sánchez, CEDINOX (Eds.), *Armaduras Acero Inoxidable*, CEDINOX, Madrid (España), 115-128.

American National Standards - American Welding Society (2005) *ANSI/AWS D1.4-M Structural Welding Code - Reinforcing Steel*.

ASTM International. (2014). *ASTM G59-97(2014) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>

ASTM International. (2014). *ASTM G199-09(2014) Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0199-09R14>

ASTM International. (2015). *ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0876-15>

ASTM International. (2015). *ASTM G102-89(2015)e1 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0102-89R15E01>

ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>

Balán-Ortiz, C. A., Luna Brito, M., Pérez López, T.; Camacho-Chab, R.J. (2017) “*Análisis estadístico de los registros de ruido electroquímico obtenidos del proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto*”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2017, 16 (1). ISSN 1665-2738, Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62049878028>

- Baltazar, M., & Almeraya, F., Nieves, D., & Borunda, A., Maldonado, E., Ortiz, A. (2007). “Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos”. *Scientia Et Technica*, 13 (36), 353- 357. Disponible en: <https://www.redalyc.org/html/849/84903663/>
- Bastidas, D. M., Zapico, C. (2014). “Comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable dúplex en solución simulada de poros de hormigón con elevado contenido de cloruros”. *Industria química*, ISSN 2340-2113, N°. 17, 2014, págs. 68-74
- Bautista, A., Paredes, E. C., Velasco, F. (2013). “Influencia del corrugado en la durabilidad de las barras austeníticas en medios sin carbonatar y con cloruros”. *Armaduras de Acero Inoxidable*, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 105-114
- Bertolini, L., Gastaldi, M., Pastore, T., Pedferri, M. P., Pedferri, P. (1998). *Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete*. International Conference on “Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures”, Federal Highway Administration, Orlando. December 7–11.
- Brown, B. L., Harrop, D., Treadaway, K.W.J. (1976) “*Corrosion Testing of Steels for Reinforced Concrete Corrosion Testing and Monitoring*”, Reprint.
- British Stainless Steel Association (BSSA) (2003) “*The Use of Stainless Steel Reinforcement in Bridges*”, Special BSSA Report - April 2003, Disponible en: <https://www.bssa.org.uk/cms/File/REBar%20report.pdf>
- Doddy, T. (1992), “*Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service*”, *Welding Journal*, 71 (3), pp. 55-60.
- DURAR (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales Maracaibo, Venezuela, ISBN 980-296-541-3.
- Dirección General de Normas Mexicanas (1988). *NMX-H-121: Procedimiento de soldadura estructural acero de refuerzo*”.
- Eden, D. A., John, D. G., Dawson, J. L. (1987), *Corrosion monitoring. International Patent WO 87/07022*. World Intellectual Property Organization, 19.
- Evans, R. M. (1962). “*Joining of Nickel-Base Alloys*”, (No.181). DMIC Report 181, Battelle Memorial Institute, Columbus 1, Ohio
- García Fuentes, A., Centeno, L., Salas García, R., Velazquez Del Rosario, A. (2011). *Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A240–A537) y comportamiento mecánico ante cargas monotónica y cíclica*, *Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales*, 2012, 32(1). Recuperado de <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/113>
- García, I. L. (2014). “*Caracterización electroquímica del acero al carbono e inoxidable en soluciones concentradas con extracto de cemento*”; Tesis que para obtener el Grado de: Maestría en Ciencias de Materiales.
- González Díaz, F. (2010). “*Recalcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*”. Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, J. A., Andrade, C., Escudero, M. L., (1984), “*Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón*”. *Rev. Iberoamericana de corrosión y protección* 15 (4), 11-19.
- Kelly, R. G; M. E. Inman, J. L. Hudson, (1996) “*Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions (STP 1277)*”, *STP 1277 Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications (ASTM International)*, pp. 101-113 DOI: <https://doi.org/10.1520/STP37954S>

- Kepler, J. L., Darwin, D., Locke Jr, C. E. (2000). *Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures* (No. K-TRAN: KU-99-6.). Kansas Department of Transportation
- Landmann, M. S., Fuentes, J. R., Bonaste, V., & Martínez, A. S. (2013). “*Rehabilitación con armaduras de acero inoxidable*”. In *Armaduras de acero inoxidable* (pp. 167-190). ISBN 978-84-695-8183-4
- Lundin, C. D. (1982). *Dissimilar metal welds-transition joints literature review*. Welding Journal, 61(2), 58-63. URL: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1982_02_s58.pdf
- Mansfeld, F., Sun, Z. (1999), *Technical Note: Localization Index Obtained from Electrochemical Noise Analysis*. Corrosion Science, 55 (10) pp. 915-918 DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3283926>
- McDonald, D. B., Pfeifer, D. W., Sherman, M. R. (1998), *Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad, and solid metallic reinforcing bars in concrete*, Report No. FHWA-RD-98-153, Federal Highway Administration, McLean, VA, December, 137 pp. URL: <https://trid.trb.org/view/496237>
- Medina, E., Cobo, A., Bastidas, D. M. (2012). “*Evaluación del comportamiento estructural y de resistencia a la corrosión de armaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 y dúplex AISI 2304 embebidas en morteros de cemento Portland*”. *Revista de Metalurgia*, 48(6), 445-458. DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1203>
- Medina, E. D. B. (2013). “*Introducción a las Armaduras de acero inoxidable*”, 1-22. URL: <http://hdl.handle.net/10261/85075>
- Molina, F.J., Alonso, C., Andrade, C. (1993), “*Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model*”, *Materials and Structures* 26, 532. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472864>
- Nurnberger, U. (1996), “*Stainless steel in concrete*”. European Federation of Corrosion publications, No. 18. London, Institute of Materials.
- Ospina Lopez, R., Aguirre Corrales, H., Parra, H. (2007). “*Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles*”. *Scientia et technica*, 13(34). Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934046>
- Pedefferri, P., Bertolini, L., Bolzoni, Pastore, F. T. (1997), “*Behavior of Stainless Steels in Concrete*,” *Proceedings of the International Seminar: The state of the art of the repair and rehabilitation of reinforced concrete structures* Eds. W.F. Silva-Araya, O.T. DE RINCÓN, and L. P. O’Neill, (Reston, VA: ASCE, 1997): p.192.
- Pérez, L.T. (2002). “*Aplicación de la Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto*”. Programa de Corrosión del Golfo de México.
- Pérez-Quiroz, J. T., Alonso-Guzmán, E. M., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Rendón Belmonte, M., Martínez-Madrid, M. (2014), “*Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise*”, *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 6734 – 6750.
- Pérez Quiroz, J. T. (2009), “*Evaluación de acero inoxidable para la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado*”. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química.
- Pourbaix, M. (1966), *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Pergamon Press, New York.
- Ramírez-Soto, J. C. I., Salgado-López, J. M., Pérez-Quiroz, J. T., Pérez-López, T., Terán-Guillén, J., & Martínez-Madrid, M. (2016). “*Effect of buttering in mechanical properties of dissimilar metal weld joints for reinforcement bars in concrete structures*”. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 248-261.
- Schierloh, M., Rougier, V., Souchetti, R. (2010). “*Vigas de hormigón armado afectadas por corrosión y reparadas con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras (PRFS)*”. IX Jornada “*Técnicas de restauración y conservación del patrimonio*”.

- Sánchez, E. M., Llorente, I., Fajardo, S., Bastidas, D. M. (2013), “*Comportamiento frente a la corrosión por cloruros de una nueva armadura de acero inoxidable dúplex de bajo contenido en níquel*”, *Armaduras de acero inoxidable*, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 91-103, Editores: CEDINOX, Centro para la investigación y desarrollo del acero inoxidable.
- Sistonen, E., Tukiainen, P., Peltola, S., Skriko, S., Lastala, M., Huovinen, S. (1998-2000), *Improving the durability of reinforced outdoor concrete structures by restricting cracks and protecting reinforcement*, part I & II. Project 1998–2002
- Soerensen, B., Jensen, P. B., Maahn, E. (1990), *The corrosion properties of stainless-steel reinforcement*. Corrosion of Reinforcement in Concrete. Ed. by C. L. Page, K. W. J. Treaday, P. B. Bamforth. Papers Presented at the Third International Symposium on "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", Belfry Hotel, Wishaw, Warwickshire, May 21-24, 1990
- Terradillos, P. G., Llorca, M. Á. C., Gómez, E. Z. (2008). “*Corrosión de Armaduras en estructuras de Hormigón Armado*”. Editorial Club Universitario. ISBN: 978-84-8454-685-6, Sapin.
- Treadaway, K. W. J., Cox, R. N., Brown, B. L. (1989), *Durability of corrosion resisting steels in concrete*. Proceedings Institution Civil Engineers, 86, pp.13–27.
- Velasco Lopez, F. J., Alvarez Arboleda, S. M., Bautista Arija, M. A. (2013), *Comportamiento frente a la corrosión de corrugados dúplex de baja aleación en disoluciones simuladas de poros de hormigón*. In: *Armaduras de acero inoxidable*, pp. 81-90, ISBN: 978-84-695-8183-4

Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Álcalis-Agregado (RAA)

D. V. Ribeiro^{1*} , R. O. Rey¹ 

* Autor de Contato: verasribeiro@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

Recepção: 19/06/2018 | Aceitação: 19/02/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

O presente artigo avaliou a RAA dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador e o uso de adições minerais, a fim de mitigar essa reação. Empregou-se o método acelerado de barras de argamassa, preconizado pela NBR 15577-4: 2008. Os resultados indicam que os agregados miúdos da região metropolitana de Salvador apresentam baixa reatividade, entretanto, os agregados graúdos apresentaram elevada reatividade e que adições minerais com características pozolânicas podem mitigar a RAA. Este estudo, apesar de se limitar às condições utilizadas, é inédito no Estado da Bahia e apresenta elevado índice de originalidade por utilizar teores de adições superiores às convencionais. Concluiu-se neste estudo que a microsílica, se utilizada em teores muito elevados, pode, inclusive, acelerar a reação.

Palavras-chave: RAA; agregados; adições minerais; mitigação.

Citar como: Ribeiro, D. V., Rey, R. O. (2019), "Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Álcalis-Agregado (RAA)", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 185 – 199, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

¹ Universidade Federal da Bahia, Brasil

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Evaluation of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador regarding the occurrence of alkali-aggregate reactions (AAR)

ABSTRACT

In the present work the AAR of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador and the use of mineral additions in order to mitigate this reaction was evaluated. The accelerated test method using mortar bars, recommended by NBR 15577-4: 2008, was used. The results indicate that the sands of the metropolitan area of Salvador have low reactivity, however, the gravels presented high reactivity and that mineral additions with pozzolanic characteristics can mitigate the AAR. This study, although limited to the conditions used, is unprecedented in the State of Bahia and presents a high index of originality, since it uses higher contents of mineral additions than conventional use. It was concluded that microsilica, if used at very high contents, can even accelerate the AAR.

Keywords: AAR; aggregates; mineral additions; mitigation

Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de Reacción Alkali-Agregado (RAA)

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la RAA de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador y el uso de adiciones minerales, a fin de mitigar esa reacción. Se utilizó el método acelerado de barras de mortero, preconizado por la NBR 15577-4: 2008. Los resultados indican que las arenas de la región metropolitana de Salvador presentan baja reactividad, sin embargo, las gravas presentaron alta reactividad y que adiciones minerales con características pozolánicas pueden mitigar la RAA. Este estudio, a pesar de limitarse a las condiciones utilizadas, es inédito en el Estado de Bahía y presenta un elevado índice de originalidad por utilizar contenidos de adiciones superiores a las convencionales. Se concluyó en este estudio que la microsílica, si se utiliza en niveles muy elevados, puede, incluso, acelerar la reacción.

Palabras clave: RAA; agregados; adiciones minerales; mitigación

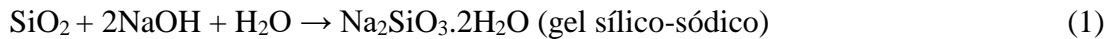
1. INTRODUÇÃO

As reações álcalis-agregado são reações químicas que ocorrem entre certos constituintes mineralógicos reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial da pasta de cimento. Esta reação tem, como produto, um gel de caráter expansivo que, na presença de água, expande, acarretando no aumento das forças internas da estrutura, gerando deformações e fissuras na superfície do concreto, podendo ter um efeito altamente prejudicial, comprometendo até mesmo a vida útil da edificação (Thomas, 2011).

Atualmente é considerada a existência de três tipos deletérios da reação, em função da composição mineralógica dos agregados e dos mecanismos envolvidos. São eles: reação álcalis-sílica, reação álcalis-silicato e reação álcalis-carbonato. No presente trabalho a reação álcalis-carbonato não foi tratada com maiores detalhes por não ser motivadora da pesquisa. O termo reação álcalis-agregado (RAA) quando mencionado no texto, será referente às reações álcalis-sílica ou álcalis-silicato.

O primeiro estágio da reação álcalis-sílica (RAS) é a reação entre os íons hidroxila (OH^-) presente na solução dos poros, e a sílica reativa do agregado. Inicialmente os álcalis contribuem no aumento da concentração de íons hidroxila na solução e, em seguida, na formação do gel expansivo

(Thomas, 2011; Beyene et al., 2013). A RAS pode ser representada de forma simplificada pelas equações (1) e (2) (West, 1996 *apud* Campos, 2015).



Para que ocorra a reação álcalis-agregado são necessárias três condições: i) presença de fases reativas no agregado; ii) umidade suficiente e; iii) concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do concreto suficiente para reagir com as fases reativas dos agregados (Giordano, 2007). As matérias-primas utilizadas na manufatura do cimento Portland são, geralmente, as responsáveis pela presença de álcalis no cimento, que varia na faixa de 0,2% a 1,5% de Na₂O equivalente (Na₂O + 0,658K₂O). Como consequência da hidratação do cimento, tem-se uma solução intersticial no concreto contendo essencialmente hidróxido de sódio, cálcio e potássio. Normalmente, dependendo da quantidade de álcalis, o pH da solução nos poros varia de 12,5 a 13,5. Este pH representa um líquido fortemente alcalino no qual algumas rochas ácidas (agregados compostos de sílica e minerais siliciosos) não permanecem estáveis (Giordano, 2007). Ou seja, a presença de álcalis influencia na reatividade do agregado e na extensão da reação, uma vez que quanto mais álcalis disponíveis, maior a concentração de OH⁻ na solução dos poros e, conseqüentemente, mais sílica será dissolvida (Beyene et al., 2013).

É preciso estar atento para a ocorrência da reação álcalis-agregado, já que, uma vez formado o gel expansivo, não há maneiras de reverter o processo, apenas minimizar os seus danos. Estudos recentes (Thomas, 2011; Beyene et al., 2013) demonstram que a expansão é reduzida quando um cimento pozolânico ou adições minerais pozolânicas são utilizados e, por isso, é indicada a utilização de adições minerais pozolânicas, tais como sílica ativa e metacaulim, na mistura do concreto. Estes estudos avaliam os efeitos de adições minerais sobre a reação álcalis-agregado e observam que a utilização de uma quantidade suficiente de uma adição mineral adequada é uma das medidas mais eficientes para a prevenção da RAA, controlando a expansão quando um agregado prejudicialmente reativo é usado em concreto (Thomas, 2011).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Neste trabalho foi utilizado o cimento padrão fornecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), contendo elevados teores de álcalis e indicado para ensaios acelerados de avaliação da RAA e o cimento Portland CP V ARI-RS (equivalente ao cimento tipo V, high sulfate resistance, de acordo com a ASTM C150), constituído essencialmente por clínquer e sulfato de cálcio, comprovadamente não mitigador da reação álcalis-agregado, devido à ausência de pozolanas, permitindo avaliar adequadamente o efeito da presença das adições utilizadas (metacaulim e sílica ativa).

A areia empregada para a moldagem dos corpos de prova para análise da reatividade e análise de desempenho das argamassas, oriunda da cidade de Camaçari, foi adquirida em centros comerciais de Salvador. O agregado graúdo reativo utilizado para os ensaios de expansão com o metacaulim e a sílica ativa foi fornecido por uma pedreira de Salvador.

Utilizaram-se água deionizada para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de expansão da RAA e água proveniente da rede pública de abastecimento, para a moldagem dos corpos de prova para a análise de desempenho das argamassas. Foi utilizado, também, aditivo químico superplastificante a base de água.

2.2. Métodos

2.2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais foram caracterizados quanto à massa específica, utilizando a NBR 9776 (“Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”) para a areia e a técnica de picnometria a gás hélio (AccuPyc II 1340 Micromeritics) para o metacaulim, a sílica ativa e o cimento CPV ARI-RS (equivalente ao cimento tipo V, de acordo com a ASTM C150).

A área superficial do metacaulim e da sílica foi determinada pelo método BET ou Teoria de Adsorção Multimolecular, e a do cimento foi determinada pelo método de Blaine, de acordo com a norma ABNT NBR NM 76 (ABNT, 1998).

2.2.2 Moldagem das argamassas

Para confecção dos corpos de prova utilizados na caracterização das argamassas, utilizou-se o traço mássico 1: 3 (cimento: areia) com relação água/aglomerante de 0,6, em peso, com a presença de adições minerais e aditivo superplastificante em diversos teores, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Consumo de material necessário para produção de 1m³ de argamassa com sílica ativa ou metacaulim.

Teor	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Sílica Ativa ou Metacaulim (kg)	Relação água/aglomerante	Relação água/cimento
REF	485,45	1456,35	291,27	1,37	0,00	0,60	0,60
10%	436,90	1456,35	291,27	3,55	48,55	0,60	0,67
15%	412,63	1456,35	291,27	7,10	72,82	0,60	0,71
20%	388,36	1456,35	291,27	14,20	97,09	0,60	0,75

A fim de relacionar as propriedades físicas das argamassas com o seu comportamento em relação à reação álcalis-agregado e analisar a influência das adições ativas na preparação das mesmas, foram feitos ensaios de análise de desempenho das argamassas utilizadas. O estudo experimental envolveu ensaios de resistência (ABNT, 2005), capilaridade e densidade aparente por meio do Princípio de Arquimedes, para análise de desempenho das argamassas quando utilizada a adição ativa. Para tal, foram moldados 4 corpos de prova (por idade) para cada determinação.

Para estudos da RAA, foram feitos ensaios acelerados de expansão de barras de argamassa, prescritos pela norma NBR 15577/2008 Partes 4 e 5 (ABNT 2004a; ABNT 2004b), para verificação da reatividade dos agregados quanto a reação álcali-agregado e a capacidade de mitigação das adições minerais para esse tipo de reação.

2.2.3 Análise de desempenho das argamassas

a) Resistência Mecânica

Para análise de desempenho quanto à resistência mecânica, foram feitos ensaios de resistência à compressão axial e tração na flexão, com corpos de prova nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005).

O limite de resistência à compressão axial (R_c) é dado pela razão entre a carga máxima (P) suportada pelo corpo de prova e a área da sua secção original (A), conforme a equação (3).

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

A resistência à tração na flexão (R_{TF}) é determinada por meio da equação (4).

$$R_{TF} = \frac{PL}{B.D^2} \quad (4)$$

Em que P = carga máxima aplicada, em N; L = distância entre cutelos de suporte, em mm; B = largura do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm; D = altura do corpo-de-prova, na seção de ruptura, em mm.

b) Porosidade e Densidade aparentes

Com base nos princípios de Arquimedes, é possível fazer a verificação da porosidade e densidades aparentes das composições utilizadas. A técnica consiste em comparar as massas dos corpos de prova antes e depois da imersão em água. As amostras foram pesadas ainda secas (M_s) e, em seguida, imersas em água, onde são deixadas durante 24 horas para que haja saturação das mesmas. Após esse período, determina-se a massa imersa (M_i) e a massa úmida (M_u), então, calculamos a porosidade aparente (P_a) e a densidade aparente (D_a), utilizando as equações (5) e (6).

$$\% P_a = 100 \cdot \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \quad (5)$$

$$D_a = \rho \cdot \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (6)$$

Em que ρ é a densidade do líquido (para a água, ρ é igual a 1,0 g/cm³)

c) Absorção de água por Capilaridade

A absorção excessiva de água é um indicador de uma maior difusão de elementos e soluções para dentro da mistura, aumentando as chances de ocorrência de corrosão e, também, da reação álcalis-agregado, sendo, assim, fundamental para o presente estudo.

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado com três corpos de prova de dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada composição, na idade de 28 dias. Inicialmente esses corpos de prova são secos em estufa por 24 horas e, em seguida, resfriados à temperatura ambiente. Determina-se a massa dos corpos de prova secos e, então, coloca-os sobre uma lâmina d'água no nível constante e igual a 7±1 mm da base do corpo de prova. Durante o ensaio, determina-se a massa dos corpos de prova com intervalos de tempo normalizados pela NBR 9779 (ABNT, 2012). Assim, calcula-se o coeficiente angular da reta de absorção capilar (massa de água absorvida por metro quadrado de argamassa) em função da raiz quadrada do tempo, que representa o coeficiente de absorção capilar.

2.2.4 Determinação da Reatividade álcalis-agregado (RAA)

O método utilizado para avaliar a reatividade dos agregados da região metropolitana de Salvador quanto à reação álcali-agregado foi o definido pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a). Esse método consiste em avaliar a expansão dimensional de barras de argamassa submetidas a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, a 80°C.

Para o preparo da argamassa o agregado graúdo deve ser obtido com um mínimo de britagem, de forma a produzir um produto classificado conforme a norma. Foram moldadas barras de dimensão 25 mm x 25 mm x 285 mm com proporções em peso de cimento: agregado de 1 : 2,25 com relação a/c fixada pela norma e igual a 0,47 e utilizando um cimento-padrão fornecido pela ABCP, próprio para realização desse tipo de ensaio e que atenda aos requisitos da ABNT NBR 5732 (ABNT, 1991).

2.2.5 Avaliação da eficiência das adições ativas em mitigar a ocorrência da RAA

O método definido pela norma NBR 15577-5 (ABNT, 2008b), com o mesmo princípio do método da ABNT NBR 15577- 4 (ABNT, 2008a) é indicado para avaliar a eficiência de materiais pozolânicos em mitigar a expansão decorrente da reação álcalis-agregado.

Neste método são realizadas misturas sem adições e com adições. Foram confeccionadas três barras de argamassa com dimensões 25 mm x 25 mm x 285 mm para cada este. Utilizou-se o cimento Portland CPV ARI-RS (equivalente ao cimento tipo V, de acordo com a ASTM C150), comprovadamente não mitigador da RAA e o agregado reativo disponível da região.

As medidas de expansão são feitas de maneira semelhante à NBR 15577-4 (ABNT, 2008a), e ao final dos 30 dias faz-se a análise comparativa da expansão nas barras de argamassa de referência (sem adições) e das barras de argamassa com adição de metacaulim e sílica ativa, nos teores de 10%, 15% e 20%. Dessa maneira é possível concluir se o material contribuiu ou não para a redução da expansão provocada pela RAA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos Materiais

A composição química do cimento e as características físicas dos materiais utilizados no estudo se encontram nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Composição química do cimento, determinada por FRX.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Teor de Álcalis		
					Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq} *
19,10	4,84	3,19	61,12	2,73	0,24	0,70	0,70

$$* \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$$

Tabela 3. Características Físicas dos materiais

Propriedades	CPV ARI RS	Metacaulim	Sílica	Areia
Massa específica (g/cm ³)	3,08	2,68	2,35	2,66
Área superficial específica BET (m ² /g)	0,33	16,85	9,78	-
Finura peneira 75 µm (%)	2,39	-	-	-

3.2 Análise de desempenho das argamassas

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão, nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura, das argamassas com substituição parcial do cimento pela sílica ativa e metacaulim, respectivamente. O traço utilizado foi 1:3, com relação água/aglomerante (cimento+adição) igual a 0,6, conforme Tabela 1. Utilizou-se, também, aditivo superplastificante a fim de garantir trabalhabilidade à mistura.

Observa-se que na medida em que se aumenta o teor de sílica ativa, há um aumento na resistência mecânica da argamassa, atingindo valores de compressão axial de 35,2 MPa com 20% de sílica ativa, enquanto que a argamassa de referência apresentou resistência de 27,8 MPa (aumento de

27%). Comportamento semelhante é observado para os resultados de tração na flexão, porém, para teores de substituição inferiores a 20%, aos 28 dias, os corpos de prova apresentaram resistência próxima aos corpos de prova da argamassa de referência.

O aumento da resistência também é observado com 15% de metacaulim (Figura 2), onde a compressão axial atinge o valor de 32,5 MPa, enquanto que a argamassa de referência apresentou resistência de 27,8 MPa (aumento de 17%). Embora as argamassas de 10% tenham apresentado resistência inferior às de referência, os resultados se encontram em faixas de erro muito próximas, concluindo-se então que não houve variação de resistência considerável com adição de 10% do material.

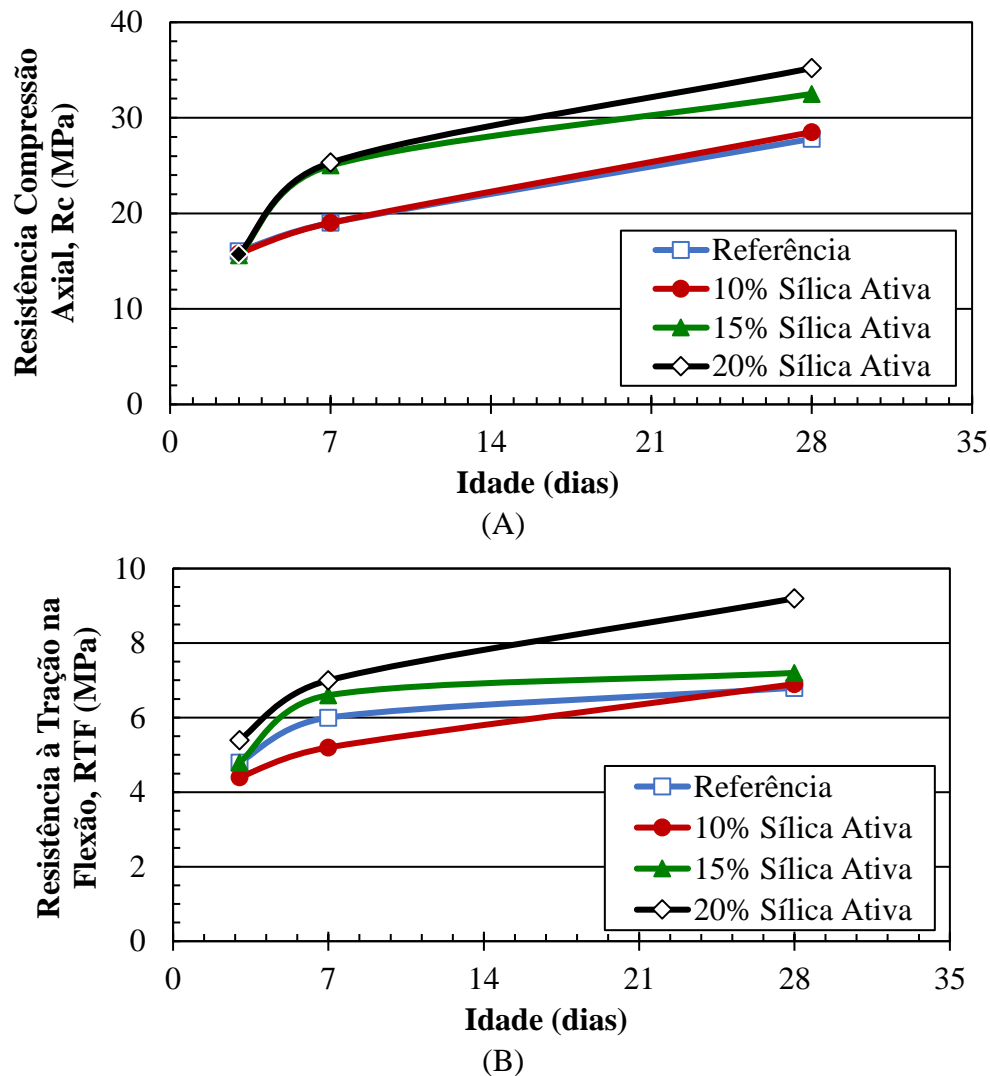


Figura 1. (A) Resistência à compressão axial e (B) à tração na flexão das argamassas contendo sílica ativa, em substituição parcial ao cimento Portland, em função da idade.

Nos resultados de tração na flexão, também não se observou aumento significativo da resistência nas argamassas com a adição. Este comportamento foi observado por Beltrão (2010) ao ensaiar corpos de prova de concreto com adição de metacaulim nos teores de 6%, 10% e 14%.

Segundo Hassan et al. (2012) os resultados de resistência à compressão aos 28 dias mostram que a adição de qualquer teor de metacaulim aumenta a resistência à compressão do concreto. Porém, não há uma “linearidade” na relação entre o teor utilizado e o aumento da resistência, uma vez que o concreto com 8% de metacaulim apresentou resultados melhores do que os de 11%. Munhoz

(2007) também observou um decréscimo na resistência à compressão quando comparados os resultados dos corpos de prova com 5% e 10% da adição ativa, sendo o resultado de 10% o menor apresentado quando comparado com teores de 5% até 20%.

Além disso, observou-se uma melhora de apenas 7% da resistência à compressão, a partir da adição de 8% de metacaulim, quando utilizado teores até 25% (Munhoz, 2007). É possível que tenha ocorrido uma “saturação da argamassa”, isto é, a quantidade de adição disponível permaneceu muito maior do que a quantidade de hidróxido de cálcio (produto da hidratação do cimento). Com essa relação “desproporcional”, a reação pozolânica ocorrerá de maneira mais lenta, retardando a formação do CSH e resultando, assim, em um menor aumento na resistência com altos teores de adição (Beltrão, 2010).

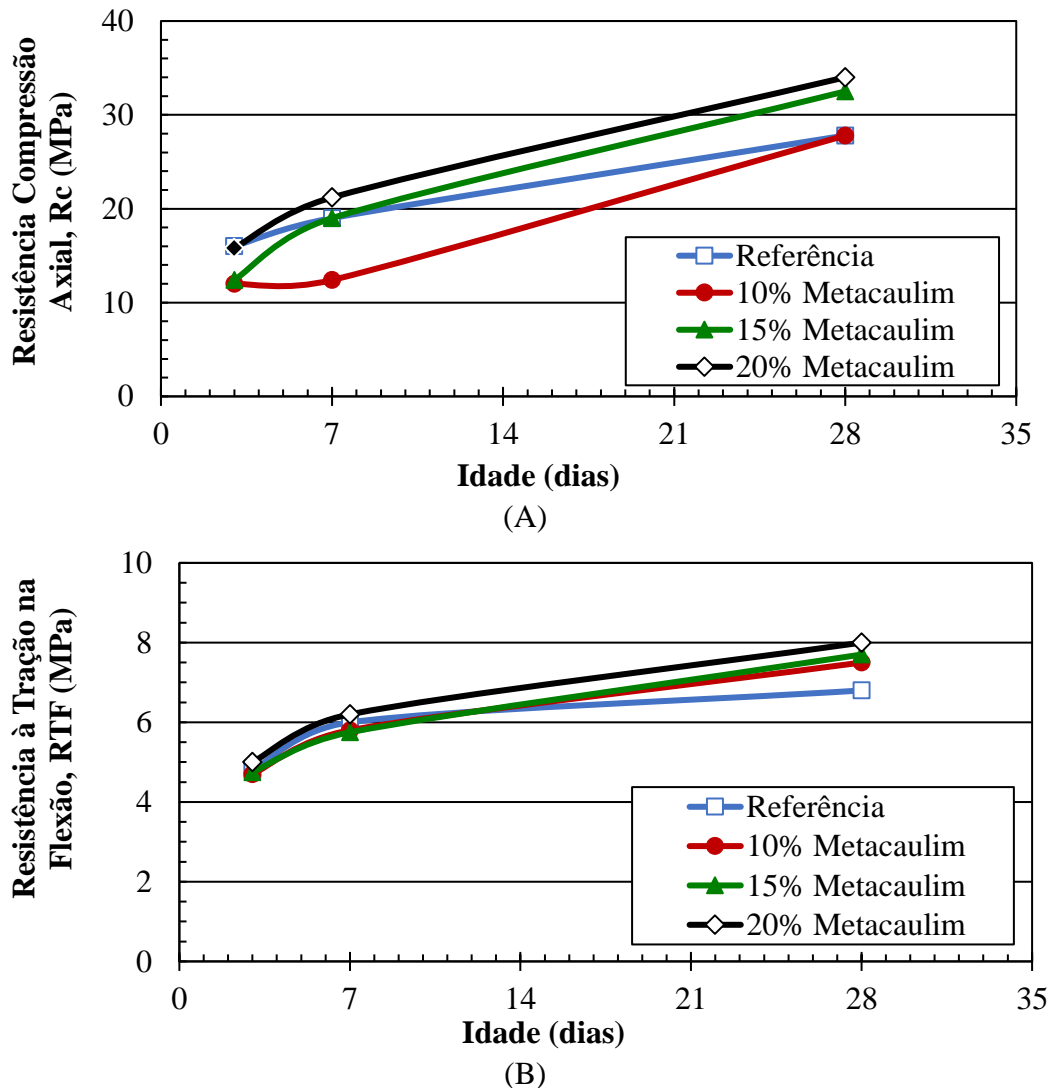


Figura 2. (A) Resistência à compressão axial e (B) à Tração na flexão das argamassas contendo metacaulim, em substituição parcial ao cimento Portland, em função da idade.

O aumento da resistência das argamassas com sílica ativa e metacaulim ocorre porque a pozolana, juntamente com o hidróxido de cálcio, gera compostos ligantes, de características similares aos compostos decorrentes da hidratação direta dos grãos de clínquer. Como consequência tem-se uma estrutura mais compacta, química e mecanicamente mais resistente que a do cimento Portland

comum. Assim, a presença de cimentos pozolânicos contribui para uma maior compacidade e resistência à compressão após 28 dias de cura e maior impermeabilidade à água (Giordano, 2007). O uso da sílica e do metacaulim permitiu a obtenção de uma argamassa menos permeável, conforme o esperado e também observado em estudos de Gomez-Zamorano et al. (2015). A partir dos resultados de caracterização (tabela 3), tem-se que a sílica e o metacaulim são materiais mais finos do que o cimento, uma vez que apresentam maior área superficial. As partículas mais finas dessas adições tendem a diminuir a quantidade relativa de poros capilares, refletindo numa redução da absorção de água por capilaridade, como observado na Figura 3.

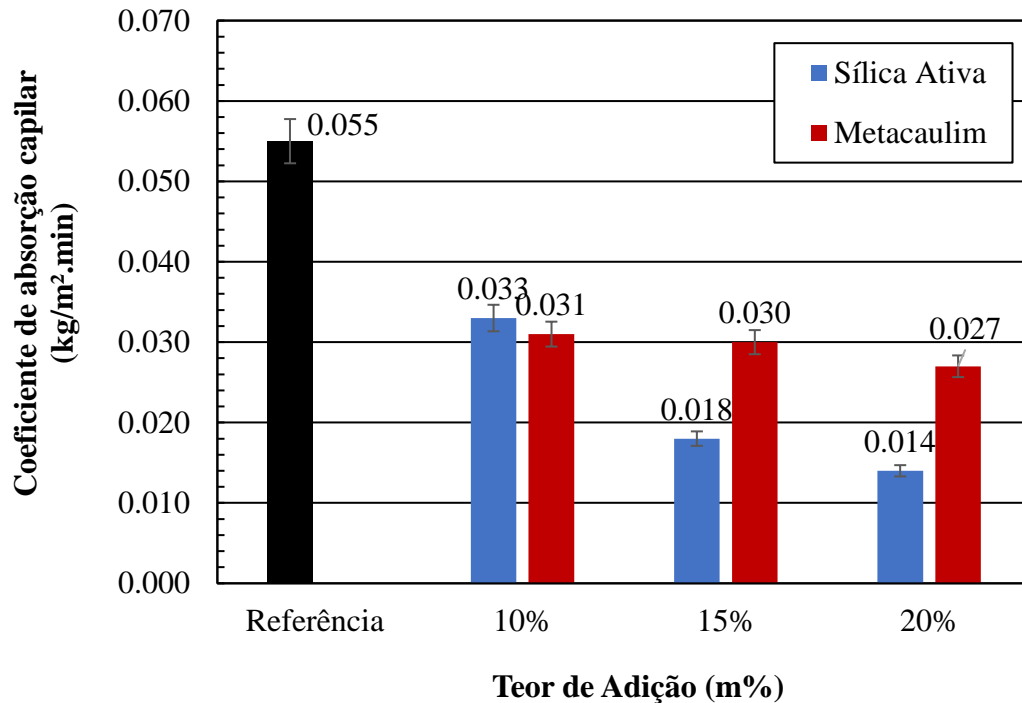


Figura 3. Coeficiente de absorção capilar de argamassas contendo sílica ativa e metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland, após 28 dias de cura.

A Figura 4 apresenta os resultados de densidade e porosidade aparentes para argamassas de referência (sem adição) e contendo sílica ativa e metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland. Observa-se que não há variação significativa na densidade da argamassa ao se substituir parcialmente o cimento Portland pelos materiais pozolânicos, entretanto, observa-se um aumento significativo na porosidade ao utilizar a sílica e uma redução na porosidade ao utilizar o metacaulim.

Uma vez que o metacaulim e a sílica ativa são materiais mais finos que o cimento, espera-se que haja preenchimento dos poros, além de seu refinamento e, conseqüentemente, a redução da porosidade

Os resultados analisados por Siddique (2011), indicam que a utilização de sílica ativa reduz a porosidade do concreto, diferente do que foi observado neste trabalho. Acredita-se que a utilização do aditivo sem redução parcial da água, tenha influenciado neste comportamento, pois, apesar da relação água/aglomerante ter se mantido constante, a relação a/c variou, conforme apresentado na tabela 1. Para maiores teores de sílica, tem-se maior relação a/c e, conseqüentemente, maior quantidade de água na mistura. A água adicional, que não é consumida na hidratação do cimento, permanece livre no sistema e, ao evaporar, dá origem ao aumento da porosidade da argamassa.

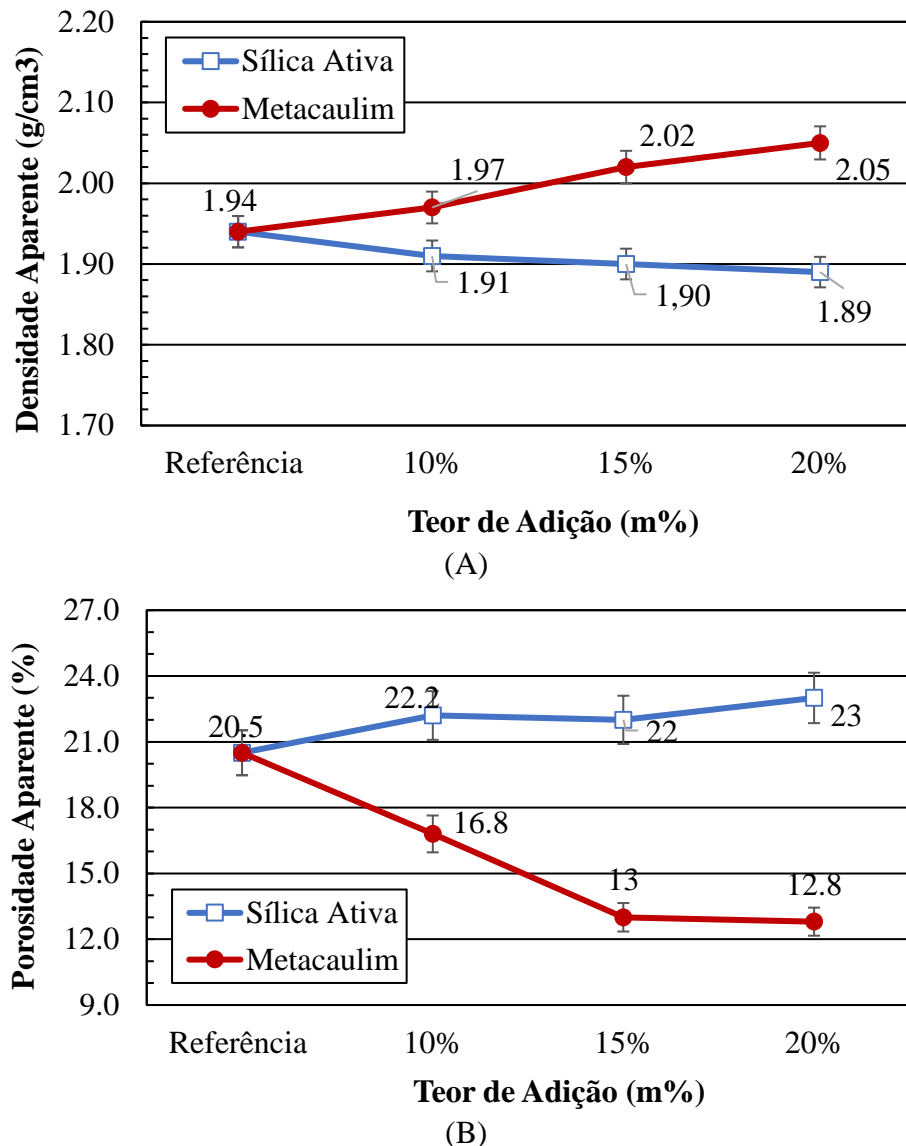


Figura 4 – (A) Densidade e (B) porosidade aparentes das argamassas contendo sílica ativa e metacaulim, em substituição parcial ao cimento Portland, após 28 dias de cura.

3.3 Determinação da reatividade dos agregados da região metropolitana de Salvador

Foram analisadas algumas areias e britas provenientes de jazidas localizadas na região metropolitana de Salvador (RMS) e em Feira de Santana. A Figura 5 apresenta os resultados de expansão das barras de argamassa, submetidas ao ensaio de RAA, em função do tempo de ensaio, para diversos agregados graúdos. De acordo com a norma NBR 15577:2008, para ensaios de RAA para avaliação de agregados graúdos, estes devem ser triturados, a fim de se obter uma granulagem desejada e semelhante a um agregado miúdo.

A Figura 6 apresenta os resultados de expansão das barras de argamassa, submetidas ao ensaio de RAA, em função do tempo de ensaio, para agregados miúdos comercializados na região metropolitana de Salvador (RMS) e em Feira de Santana.

Assim, analisando os resultados obtidos com os agregados utilizados, observa-se que, de maneira geral, os agregados graúdos são reativos quanto a reatividade álcalis-agregado, enquanto que os agregados miúdos são potencialmente inócuos. Sendo assim, há restrições quanto à utilização das britas na RMS. A depender das condições de umidade e do cimento selecionado, será necessário utilizar adições ativas no concreto para mitigar a RAA.

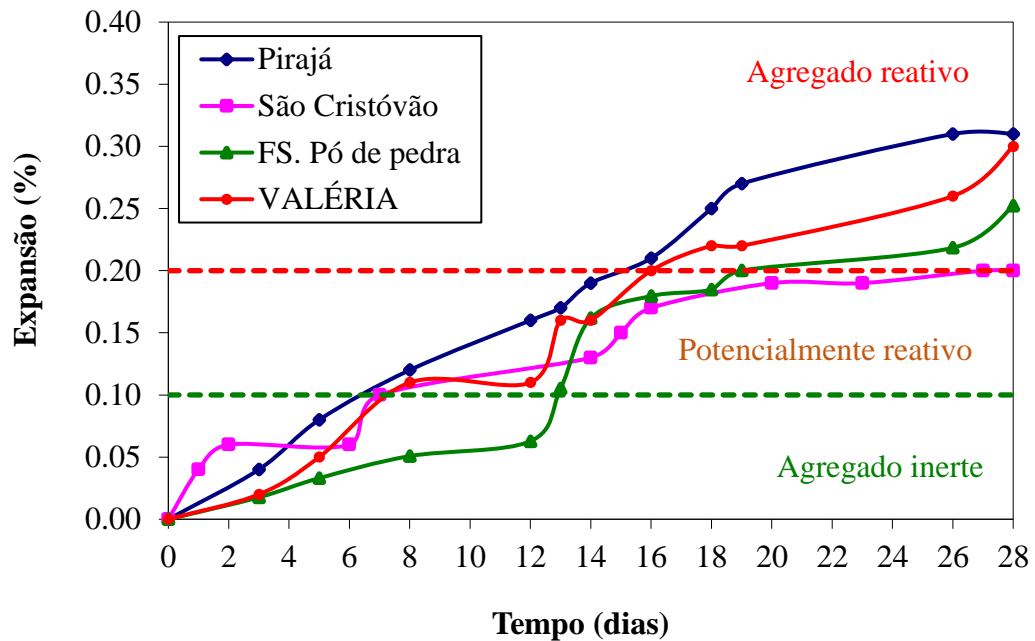


Figura 5. Expansão das barras, devido à reação álcalis-agregado (RAA), em argamassas contendo agregados graúdos comercializados em Salvador.

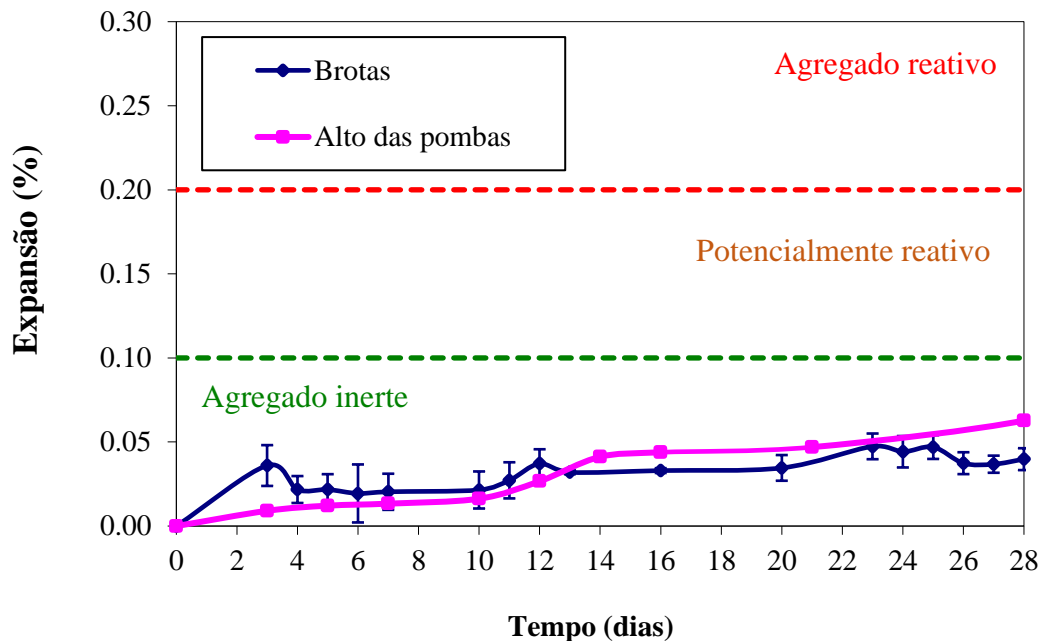


Figura 6. Expansão das barras, devido à reação álcalis-agregado (RAA), em argamassas contendo agregados miúdos comercializados em Salvador.

3.4 Avaliação da eficiência das adições ativas em mitigar a RAA

Os resultados das investigações das expansões realizadas pelo método acelerado, na presença da sílica ativa e metacaulim são apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

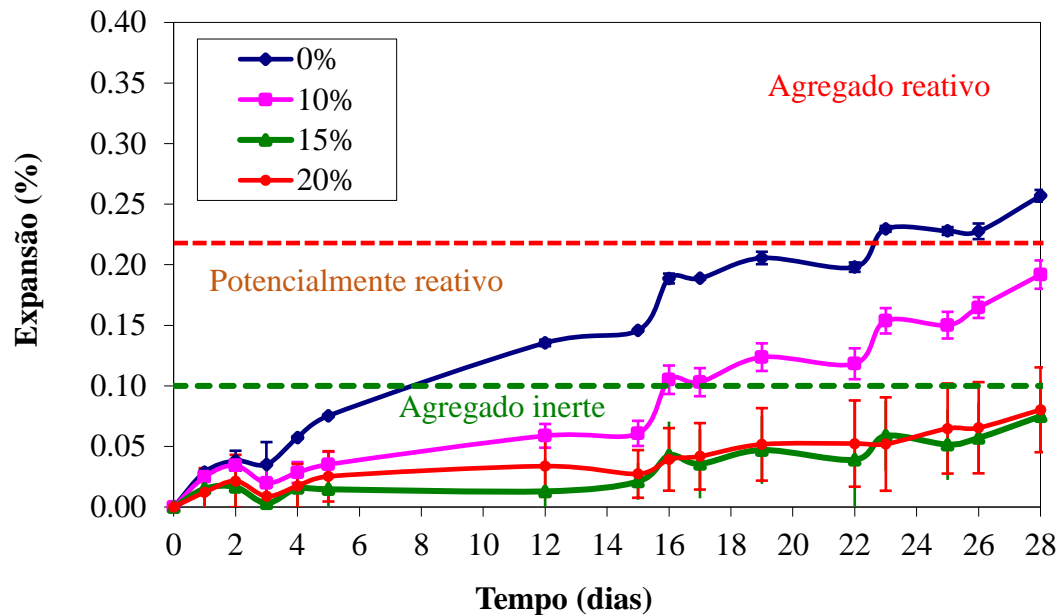


Figura 7. Expansão das barras, devido à reação álcalis-agregado (RAA), em argamassas contendo adição de 10%, 15% e 20% de sílica ativa.

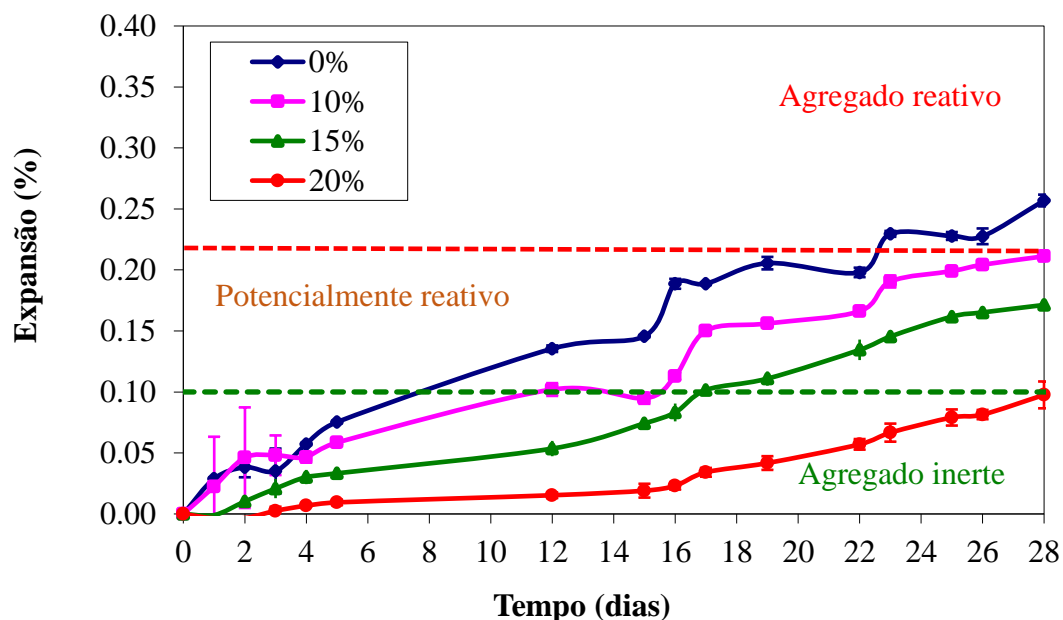


Figura 8. Expansão das barras, devido à reação álcalis-agregado (RAA), em argamassas contendo adição de 10%, 15%, 20% de Metacaulim.

O comportamento dos corpos de prova com adição de sílica ativa (Figura 7) foi semelhante ao observado por diversos autores (Thomaz, 2011; Hasparyk e Farias, 2013; Lindgard et al., 2012), que verificam que o aumento do teor desta adição, contribui para a mitigação da reação, devido às propriedades pozolânicas do material.

Os trabalhos citados utilizaram teores máximos de sílica ativa entre 12% e 15%, porém, na presente pesquisa, optou-se por utilizar teores mais elevados com o intuito de verificar se o uso indiscriminado desse material interfere na RAA. Observou-se que ao atingir o teor de 15%, houve

uma estagnação na capacidade mitigadora desta adição. Assim, ao utilizar teores superiores a este, espera-se que não haja uma melhoria no comportamento do material, podendo, inclusive, resultar em comportamento inverso, ou seja, o aumento da RAA, pois, uma vez que a sílica ativa é uma sílica amorfa, e, portanto, reativa, acredita-se que, se utilizada em excesso, possa ocorrer uma “saturação” desse material na solução intersticial dos poros da matriz cimentícia. Parte da sílica ativa reagirá com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como um material pozolânico, e a parte em excesso ficará disponível para reagir com os álcalis que não foram incorporados na estrutura do C-S-H.

O comportamento dos corpos de prova com adição de metacaulim (Figura 8) foi semelhante ao observado por outros autores (Munhoz, 2007; Hasparyk e Farias, 2013). O aumento do teor de metacaulim contribuiu para a mitigação da reação, devido às propriedades pozolânicas do material. Observou-se uma crescente redução na reatividade à medida em que se adicionou o metacaulim. A norma determina que a comprovação da mitigação da reação será obtida quando o resultado do ensaio acelerado em barras de argamassa for menor que 0,10 % aos 16 dias (França et. al, 2016). Logo, a partir dos resultados obtidos, é possível prever que utilizando teores de metacaulim superiores a 15%, haverá maior redução da expansão e será possível mitigar a RAA apresentada neste agregado, no entanto, estes resultados só se mostraram efetivos ao se adicionar 20% deste material.

Ao se comparar o desempenho das adições minerais, observa-se que a sílica ativa se apresentou mais efetiva na mitigação da ocorrência das reações álcalis-agregado.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados do presente trabalho, conclui-se que:

- Todos os agregados graúdos comercializados na região metropolitana de Salvador, estudados na presente pesquisa, são classificados como agregados reativos quanto à ocorrência de RAA;
- Os agregados miúdos comercializados na região metropolitana de Salvador, originados das jazidas da região de Camaçari, são classificados como agregados potencialmente inócuos quanto à ocorrência de RAA;
- A análise de desempenho das argamassas ratificou que a utilização de sílica ativa e metacaulim melhoram as propriedades das matrizes cimentícias, resultando em argamassas mais resistentes à compressão e à tração na flexão e com menor permeabilidade;
- A sílica ativa mostrou capacidade em mitigar as expansões ocasionadas pela reação álcalis-agregado, atingindo o ponto de saturação em 15% de adição;
- Quando utilizada em excesso pode ocorrer uma “saturação” da sílica ativa na solução intersticial dos poros da matriz cimentícia, assim, a parcela que não reagirá com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em excesso, ficará disponível para reagir com os álcalis que não foram incorporados na estrutura do C-S-H;
- O metacaulim mostrou crescente capacidade em mitigar as expansões ocasionadas pela reação álcalis-agregado quando aplicada nos teores de 10%, 15% e 20%;
- A sílica ativa se mostrou mais efetiva quanto à mitigação da RAA em comparação ao metacaulim.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio das empresas LC Lactose, Metacaulim do Brasil, Companhia de Ferro Ligas da Bahia (Ferbasa), Vedacit e Mizu Cimentos, que doaram os materiais utilizados na pesquisa. Agradecemos, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). *NBR 5732: Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar - Método de Blaine*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008a). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008b). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro
- Beltrão, F. C. M. (2010), “*A influência do metacaulim nas propriedades do concreto*”, Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p.44.
- Beyene, M., Snyder, A., Lee, R. J., Blaskiewicz, M. (2013), *Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates*. *Cement and Concrete Research*. 51(9). 85-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.014>
- Campos, R. N. (2015) “*Durabilidade em concretos contendo cinza de biomassa contendo elevado teor de álcalis*”, Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, p. 89.
- França, D. F. S., Rey, R. O., Ferreira, L. R. C., Ribeiro, D. V. (2016) *Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland*. *Ambiente Construído*, 16 (3), 153-166, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300098>
- Gamino, A. L. (2003), “*Reações álcali-agregado: análise da potencialidade de ocorrência em agregados utilizados no laboratório de engenharia civil da FEI/UNESP*”. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, pp. 42-54.
- Giordano, B. L. (2007), “*Estudo da reação álcali-agregado dos agregados da região metropolitana de Belém*”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p. 47.
- [Gomez-Zamorano, L. Y.](#), [Iniguez-Sanchez, C. A. E.](#), [Lothenbach, B.](#) (2015), *Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas*. *Revista ALCONPAT*, 5 (1), 18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i1.74>
- Hasparyk, N. P., Farias, L. A. (2013), “*Comportamento de adições e aditivos na expansão da reação álcali-agregado – Um estudo envolvendo reologia*”. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, pp. 1-12.

- Hassan, A. A. A., Lachemi, M., Hossain, K. M. A. (2012), *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites, 34(6), 801– 807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013>
- Lindgard, J., Andiç-Çakir, O., Fernandes, I., Ronning, T. F., Thomas, M. D. A. (2012). *Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing*. Cement and Concrete Research, 42(2), 223-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.004>
- Munhoz, F. A. C. (2007), “*Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato*”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 p.
- Siddique, R. (2011), *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*, Resources, Conservation and Recycling, 55 (11) 923–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Thomas, M. (2011), *The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review*. Cement and Concrete Research, 41(12), 1224–1231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>

Estudo da durabilidade de traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas

M. Rendón Belmonte¹ , M. Martínez Madrid¹ , R. V. Martínez Pérez¹ , J. T. Pérez Quiroz¹ 

*Autor de Contacto: marielarb17@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

Recepção: 20/06/2018 | Aceitação: 28/02/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este artigo descreve propriedades relativas à durabilidade de cinco traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas (CVA) e cimento Portland tipo CPC 40. Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica aparente, permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão. A qualidade de todas os traços foi duradoura, o desenvolvimento da resistividade elétrica e a diminuição do nível de permeabilidade ao íon cloreto foi favorecido pelo conteúdo de CVA, embora a resistência à compressão em maior conteúdo de CVA tenha sido menor. O percentual máximo de substituição do CVA para atender aos critérios atuais de durabilidade foi de 65%.

Palavras chave: cinza volante ativada; durabilidade; concreto ecológico.

Citar como: Rendón Belmonte, M., Martínez Madrid, M., Martínez Pérez, R. V., Pérez Quiroz, J. T. (2019), “*Estudo da durabilidade de traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas*”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 200 – 214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

¹ Instituto Mexicano del Transporte, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Study of the durability of concrete mixtures with different contents of activated fly ash

ABSTRACT

This article describes properties relating to the durability of five different mixtures of concrete with varying contents of activated fly ash (CVA) and Portland cement type CPC 40. The tests carried out were: apparent speed of ultrasonic pulse, electrical resistivity, fast ion permeability chloride and mechanical resistance to compression. The performance of all mixtures proved to be durable, the development of the electrical resistivity, and the decrease in the level of the chloride ion permeability was favored by the contents of CVA, although resistance to compression at higher content of CVA was minor. The maximum percentage of replacement of CVA to comply with the current criteria of durability was 65%.

Keywords: activated fly ash; durability; ecological concrete.

Estudio de la durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada

RESUMEN

Este artículo describe propiedades referentes a la durabilidad de cinco mezclas de concreto con distintos contenidos de ceniza volante activada (CVA) y cemento Portland tipo CPC 40. Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica aparente, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión. Los resultados indicaron que la calidad de todas las mezclas resultó durable, el desarrollo de la resistividad eléctrica y disminución del nivel de permeabilidad al ión cloruro fue favorecido por el contenido de CVA. En cuanto a las resistencias a la compresión, se notó que a mayor contenido de CVA estas resultaron menores. El porcentaje máximo de sustitución de CVA para cumplir con los criterios de durabilidad actuales resultó del 65%.

Palabras clave: ceniza volante activada; durabilidad; concretos ecológicos.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo moderno. As estimativas indicam que no ano de 2050 o consumo de cimento Portland poderá aumentar até 225% em relação aos valores atuais, principalmente devido à alta demanda deste aglomerante por países emergentes, como Índia, China, Brasil e México (Garcés et al, 2012). De acordo com a CANACEM (câmara nacional de cimento) em 2016 a produção de cimento foi de 40,6 milhões de toneladas e o consumo nacional de 40,1 milhões de toneladas.

Sabe-se que a produção mundial de cimento de 1,6 milhão de toneladas representa aproximadamente 7% da geração de dióxido de carbono na atmosfera (Mehta, 2001, Nath et al, 2011). Além disso, estruturas construídas com cimento Portland em ambientes corrosivos começam a se deteriorar após 20 a 30 anos, embora tenham sido projetadas para mais de 50 anos de vida útil (Chandra et al, 2015). A fim de reduzir o uso de recursos naturais, a quantidade de energia e as emissões de dióxido de carbono, está sendo investigado o desenvolvimento de concretos ecológicos que, além de serem amigáveis ao meio ambiente, proporcionam sustentabilidade e durabilidade para alcançar uma longa vida útil das estruturas. (Madhavi et al, 2014; Mishra, 2017).

Algumas opções consideradas para conseguir isso é a substituição parcial da quantidade de cimento Portland (CP), em particular com materiais como pozolanas naturais, sílica ativa, escória, cinzas volantes (Al-Amoudi et al, 1996; Malhotra, 1990; Mehta, 2002; Garcés et al, 2012; 2017, Moffatt et al, 2017; Mishra, 2017; Saha, 2018).

A cinza volante é um subproduto industrial gerado em grandes quantidades em todo o mundo, quase 800 milhões de toneladas por ano (Heidrich et al, 2013, International Energy Agency Coal Industry Advisory Board, 2014), mas uma quantidade significativa deste material (cerca de 50 %) é depositada em aterros, causando um grave risco ambiental e a diminuição da reatividade das cinzas devido às condições de intemperismo (Mishra, 2017).

Embora o uso de cinzas volantes como um aditivo ao concreto seja obsoleto e haja uma extensa pesquisa baseada em seu uso como material de substituição de cimento no concreto, o nível de substituição, de acordo com a literatura disponível, ainda é limitado a um máximo de 35% da massa de cimento, com base no argumento de que maiores porcentagens de substituição de cinzas volantes não melhoram as características de resistência em sua forma natural (Hemalatha et al, 2017). A fim de melhorar as propriedades e aumentar a porcentagem de substituição de cinzas volantes, diferentes abordagens foram exploradas, tais como: redução da relação água / materiais cimentícios, substituição do cimento Portland de alta resistência inicial por cimento Portland comum, substituição de uma porção da cinza volante por uma pozolana mais reativa, como sílica ativa ou cinza de casca de arroz, incorporação de nanomateriais, cura acelerada (Yu et al, 2017). Métodos químicos, mecânicos, térmicos ou combinados também foram usados para melhorar a reatividade desse resíduo (Mucsi, 2016; Sahoo, 2016). A ativação alcalina consiste em um processo químico que permite a transformação de um material com uma estrutura parcial ou totalmente amorfa em compostos cimentícios compactos (Palomo et al., 1999). Ativação mecânica é definida como ativação por meio de um processo de moagem ou por meio de peneiramento e a separação de ar e ativação térmica se refere ao resfriamento lento ou rápido, produzindo mudanças na relação vítreo/cristalino (Hela et al, 2013; Mucsi, 2016). Além desses métodos, existe a eletrometagenese, que envolve a ativação de cinzas volantes a partir da entrada de íons de uma solução alcalina pela aplicação de um campo elétrico através do concreto endurecido (Lizarazo et al., 2015). Atualmente, o uso de cinzas volantes é considerado uma solução eficaz (Zobal et al, 2017).

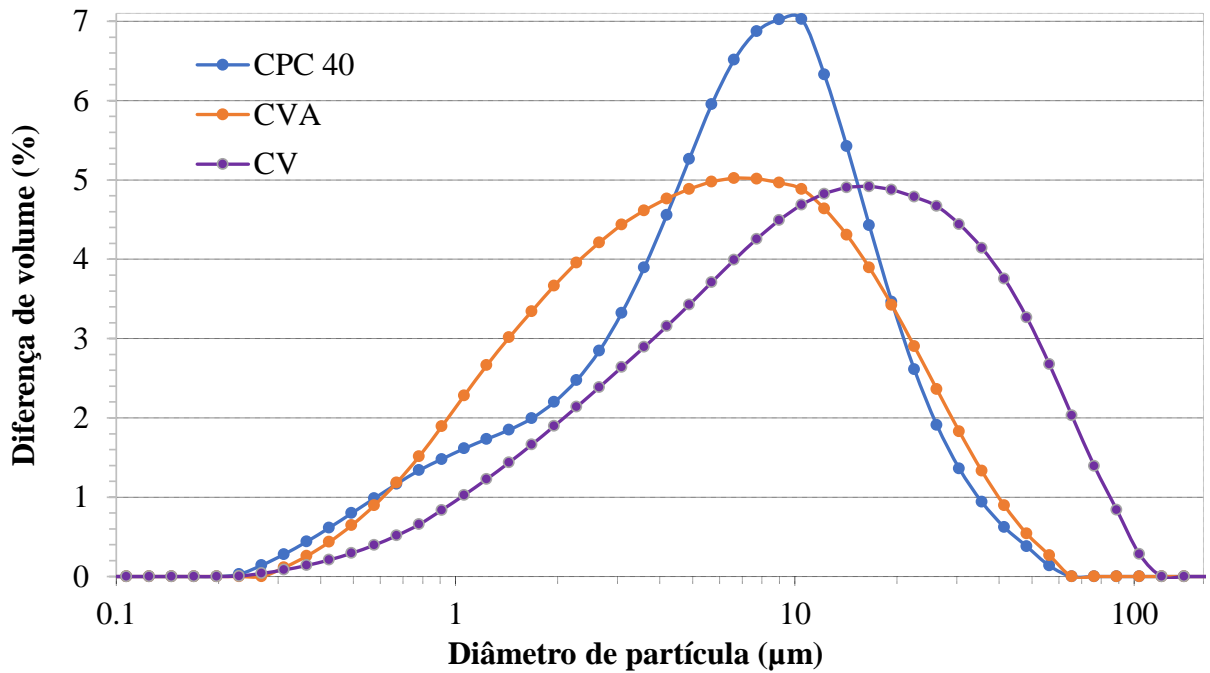
Considerando os antecedentes do uso de cinzas volantes, efeitos positivos nas propriedades do concreto, baixo custo e disponibilidade atual de cinzas volantes no México (armazenados), este artigo enfoca a determinação de propriedades como: qualidade do concreto (velocidade de pulso ultrassônico VPU), resistividade elétrica aparente (ρ), permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão, de traços com diferentes teores de cimento Portland tipo CPC 40 (cimento mais comercializado e usado na construção civil atualmente) e cinza volante submetida a um processo de ativação química através do uso de produtos químicos em pó e método de moagem, com o objetivo de melhorar sua reatividade, contribuir e enriquecer informações que promovam seu uso no setor de construção civil em nosso país.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

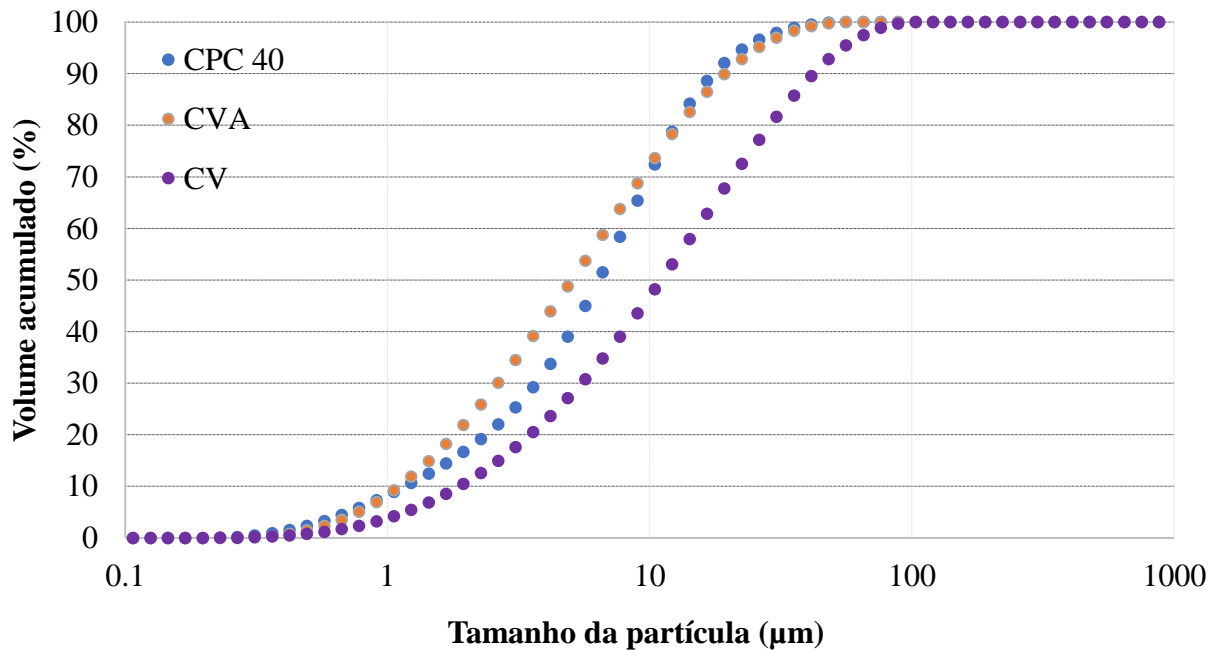
2.1. Materiais de partida

Para a elaboração dos traços de concreto, utilizou-se a marca de cimento Portland CPC 40, cinzas volantes ativadas pela adição de químicos em pós e moagem em moinho de bolas (CVA), agregados de produtos de britagem de calcário e água de rede potável.

A distribuição granulométrica do cimento (CPC 40), das cinzas volantes usadas antes da moagem (CV) e após a moagem (CVA) é mostrada na Figura 1. Esta análise foi obtida por scanner a laser. A suspensão de partículas foi preparada em etanol usando como meio de dispersão um banho de ultrassom por 5 minutos e a aproximação de Fraunhofer foi utilizada.



1a) Distribuição de partículas dos materiais de partida



2a) Tamanho da partícula dos materiais de partida

A Tabela 1 mostra as características dos agregados utilizados, valores obtidos de acordo com as normas ASTM C127 e C128.

Tabela 1. Características dos materiais utilizados para a preparação dos traços

Material	Densidade (kg/l)	Absorção (%)
Brita 5-20 mm (calcário triturado)	2.67	0.9
Areia 0-5 mm (calcário de mina/triturado)	2.40	2.40

2.2. Elaboração dos corpos de prova

Foram elaborados cinco traços com diferentes porcentagens de substituição de CVA (0, 30, 50, 65 e 75%) em relação ao peso do cimento denominado como M1, M2, M3, M4 e M5, respectivamente. A relação água / material cimentício foi de 0,35. Para alcançar esta relação, foram utilizados aditivos redutores de água e plastificante. Os traços estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Proporções dos 5 traços.

Material	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5
cimento CPC 40	kg/m ³	450	315	225	157.5	112.5
CVA	kg/m ³	0	135	225	292.5	337.5
Brita	kg/m ³	1006	1006	1006	1006	1006
Areia	kg/m ³	710	710	710	710	710
Condição de cura	°C	Sala de cura	Sala de cura	Sala de cura	Sala de cura	Sala de cura
a/mc		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

*mc: material cimentício (CVA+CPC)

De cada traço foram obtidos 39 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento, moldados segundo o procedimento da norma NMX-C-159-16, hidratados com água potável da rede municipal e curados de acordo com a Norma NMX-C-148-10. Após o período de cura (28 dias), todas as amostras foram retiradas da sala de cura e mantidas à temperatura ambiente e em condições úmidas, condição obtida pela pulverização de água potável diária, e mantidas em recipientes plásticos com tampa.

2.2. Ensaios de durabilidade

Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico (VPU) (ASTM C-597-02), resistividade elétrica (ρ) (NMX-C514-16), permeabilidade rápida ao íon cloreto (ASTM C1202-10) e resistência mecânica compressão (NMX C-083-02) em diferentes idades por um período de 122 dias. Deve-se mencionar que em cada idade do ensaio VPU e resistividade elétrica, foram avaliados quinze corpos de prova de cada traço, três corpos de prova para o caso de resistência mecânica à compressão, e duas amostras no ensaio de permeabilidade rápida ao íon cloreto foram avaliadas.

3. RESULTADOS

Em seguida, os resultados de cada ensaio realizado são descritos.

3.1 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A figura 2 apresenta o comportamento da velocidade de pulso ultrassônico.

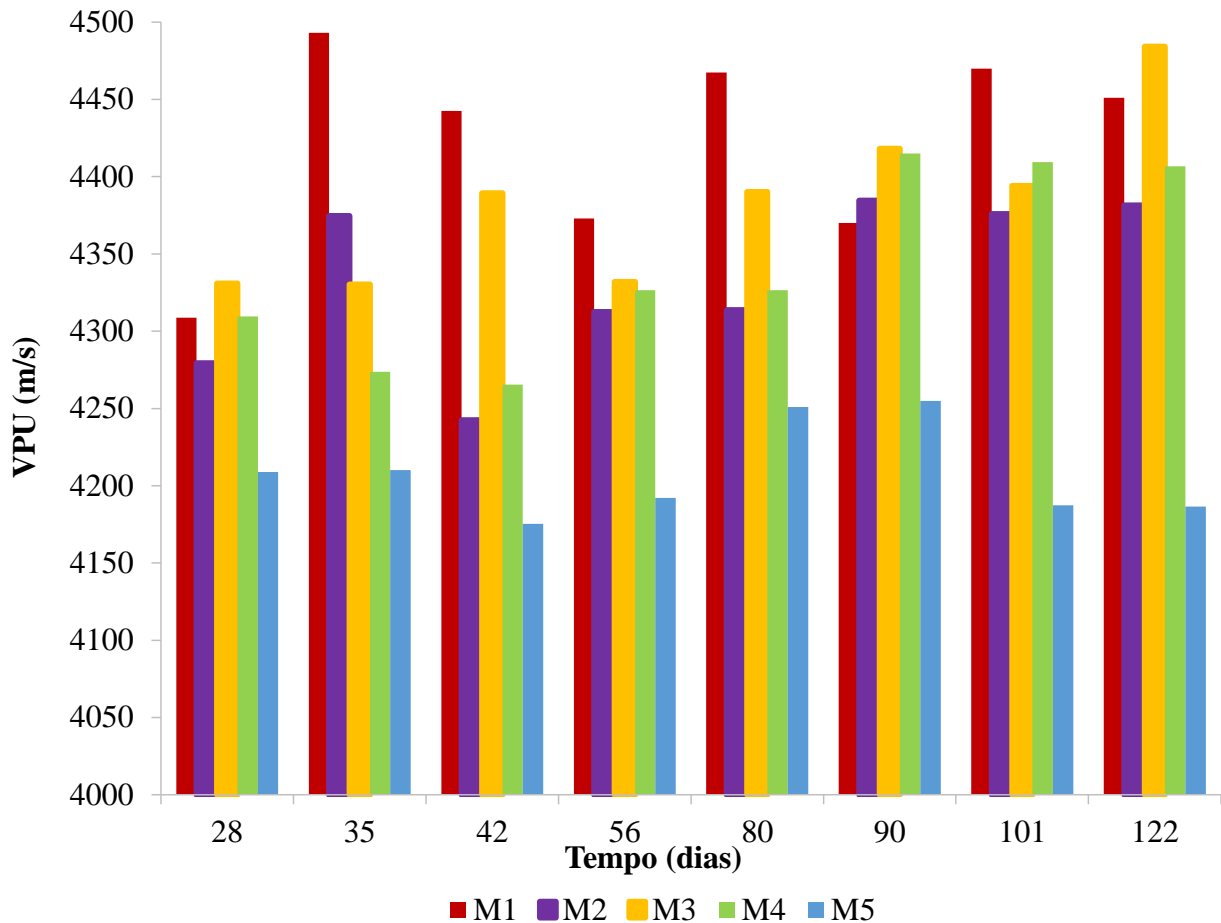


Figura 2. Velocidade de pulso ultrassônico em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

Os valores da velocidade do pulso ultrassônico obtidos nos cinco traços e em todas as idades do ensaio, relatados na Figura 2, foram superiores a 4.000 m/s, indicando que a qualidade em todos os casos resultou em durável. No entanto, no traço com maior teor de CVA (M5) foram observados menores valores em relação ao restante dos traços, este comportamento pode ser consequência da falta de hidróxido de cálcio contido no traço e fornecido pelo cimento Portland.

Considerando os resultados da VPU obtidos nesta investigação com o CVA e as informações relatadas por Al-Amoudi et al (1996), que avaliaram traços de concreto com e sem a substituição do cimento Portland por cinzas volantes (até 40%), os valores oscilaram na mesma ordem de grandeza ~ 4000 m/s.

3.2 Resistividade elétrica (ρ)

A figura 3 mostra o comportamento da resistividade elétrica aparente dos cinco traços elaborados em relação ao tempo. Deve-se mencionar que a norma NMX C-514-16 define resistividade elétrica aparente como a resistividade medida no concreto não saturado com água, condição na qual as medidas relatadas foram obtidas.

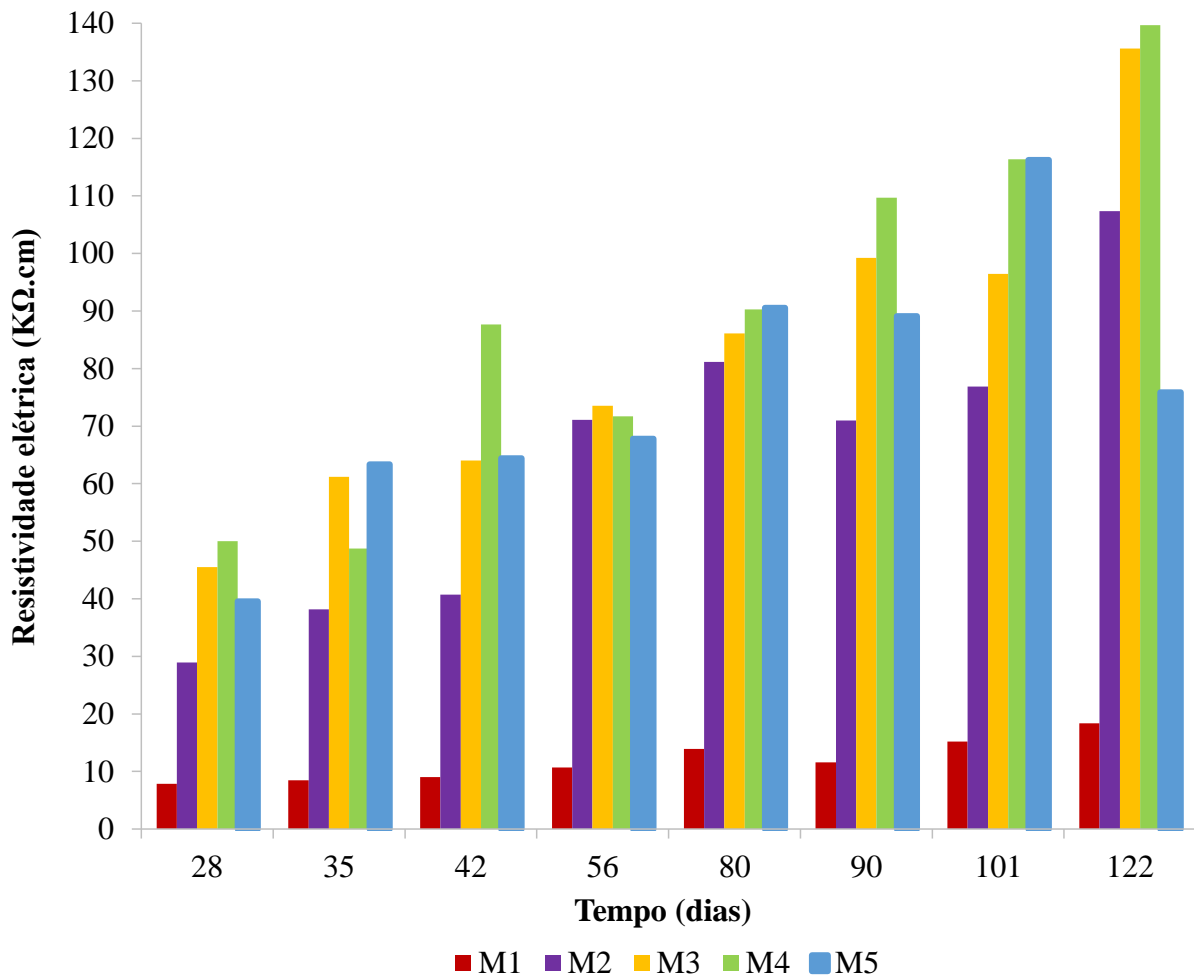


Figura 3. Resistência elétrica aparente em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

De acordo com a Figura 3, os traços com o teor de cinzas volantes ativadas apresentaram valores de resistividade elétrica mais elevados do que o traço sem o teor de CVA (M1), traço que atingiu um máximo de 18 KΩ.cm. Após 122 dias, M2 atingiu valores de 110 KΩ.cm, enquanto os traços M3 e M4 alcançaram valores próximos dos 140 KΩ.cm. No caso de M5, um decréscimo de resistividade foi observado na medição do dia 122, a partir de valores de 116 a 76 KΩ.cm, data em que um aumento no valor de permeabilidade ao íon cloreto também foi observado, como mostrado na Figura 3. Acredita-se que esse comportamento seja devido a duas causas possíveis: 1) nessa idade, a reação de CVA é mais sensível ao teor de umidade na matriz de concreto, retardando sua reação ou 2) o teor de cinzas no traço é excessivo para manter uma reação constante do CVA. No entanto, mesmo com a diminuição observada no M5, os valores de resistividade elétrica dos traços de CVA excederam os obtidos com o traço M1 (0% de cinza volante).

Considerando os critérios estabelecidos na norma mexicana NMX C-514-16 e os valores da Figura 3, o traço M1 apresentou considerável porosidade interligada, enquanto os traços M2, M3 e M4 indicaram porosidade interconectada extremamente baixa e o M5 baixa porosidade interconectada.

3.3 Permeabilidade rápida ao íon cloreto

A Fig. 4 mostra o comportamento do ensaio de permeabilidade rápida do íon cloreto dos cinco traços elaborados. Os valores reportados correspondem às idades de 28, 56, 90 e 122 dias.

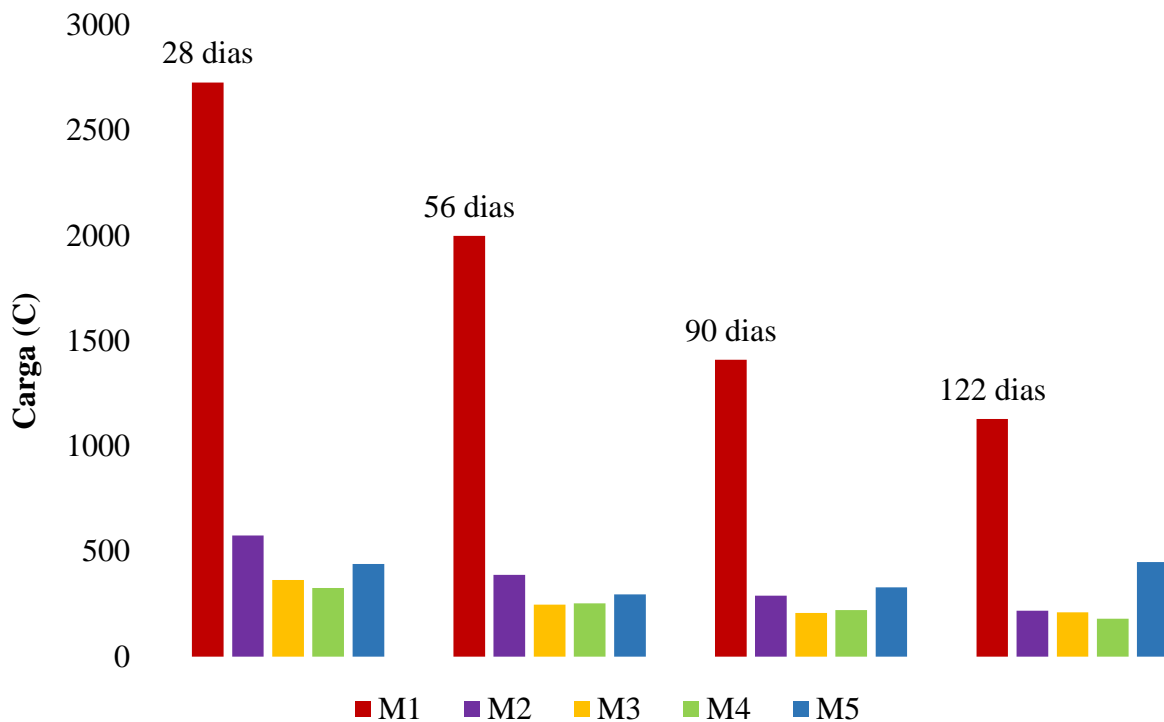


Figura 4. Rápida permeabilidade ao íon cloreto em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

Levando em conta os valores da Fig. 4 e os critérios estabelecidos na norma ASTM C-1202-12, os resultados do traço sem cinzas volantes ativadas (M1) inicialmente apresentaram valores acima de 2500 C, mas com o passar do tempo diminuíram atingindo após 122 dias valores de 1100° C, com estes valores este traço atingiu um nível de permeabilidade do íon cloreto moderado e depois baixo. Para traços com substituição de cinzas volantes ativadas, a quantidade de carga que foi obtida em todas as idades de avaliação foi menor que 500 Coulombs (C), alcançando um nível muito baixo de penetração de íons cloreto. A tendência de permeabilidade em relação ao tempo dos traços M2, M3 e M4 foi decrescente, apenas para o caso do traço M5 o comportamento foi variável, mas em pouco tempo ultrapassou os 500° C.

Traços com cinzas volantes ativadas apresentaram menor permeabilidade de íons cloreto em comparação ao traço sem cinzas volantes ativadas, coincidindo com investigações que relatam que a presença de cinzas volantes promove um baixo nível de permeabilidade a esse íon (Malhotra, 1990; Nath et al, 2011; Saha, 2018; Mittal).

3.4 Resistência mecânica à compressão

A Fig. 5 mostra a resistência mecânica à compressão e o desvio padrão (σ em MPa) obtido a partir de três ensaios por traço nas idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias, obtidos de acordo com a norma NMX. C-083-14

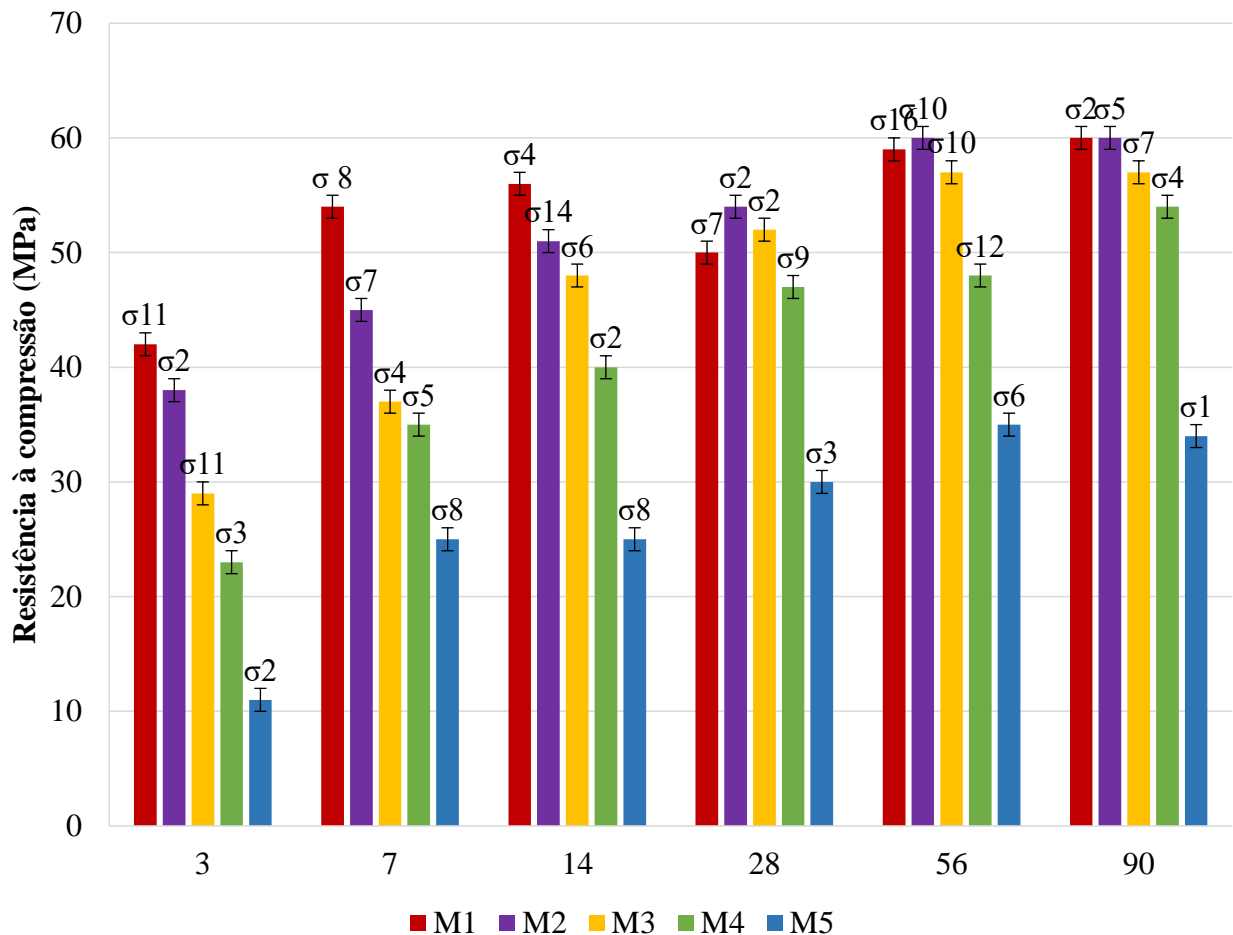


Figura 5. Resistência mecânica à compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

De acordo com a Figura 6, a resistência à compressão em idades precoces (3 e 7 dias) das amostras com teor de cinzas volantes ativadas foi menor em comparação com as amostras de controle (0% de cinza volante ativada), entretanto, com a passagem do tempo aumentou gradualmente, comportamento associado à lenta reação pozolânica da cinza volante (Nath e Sarker, 2011, Mishra, 2017, Saha, 2018).

Os valores de resistência mecânica do traço M1 interromperam seu desenvolvimento após 56 dias com valores de 60 MPa. No caso dos traços M2 e M3 após 14 dias foram superiores a 45 MPa, enquanto M4 após 28 dias. O traço M5 apresentou valores de resistência aumentando com o tempo, mas, em todas as idades, a resistência mecânica foi menor que o restante dos traços, atingindo valores máximos de 35 MPa, este resultado é atribuído principalmente à falta de hidróxido de cálcio no traço (Saha, 2018), contribuído principalmente pelo cimento Portland, que neste caso o teor no traço M5 foi de 25% em relação ao peso total do material cimentício.

Os valores de resistência à compressão foram menores quanto maior o teor de cinzas volantes ativadas no traço, embora, aos 28 dias, os traços M2, M3 e M4 tenham excedido 45 MPa, valor de resistência mecânica considerado para concretos de alta resistência, de acordo com o Manual da Rede Durar.

Visando conhecer se existe ou não uma correlação entre as propriedades relatadas, são descritas as seguintes:

3.5 Resistividade Elétrica vs. Resistência Mecânica à Compressão

A Fig. 6 mostra o comportamento da resistividade elétrica em relação à resistência mecânica dos cinco traços após 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

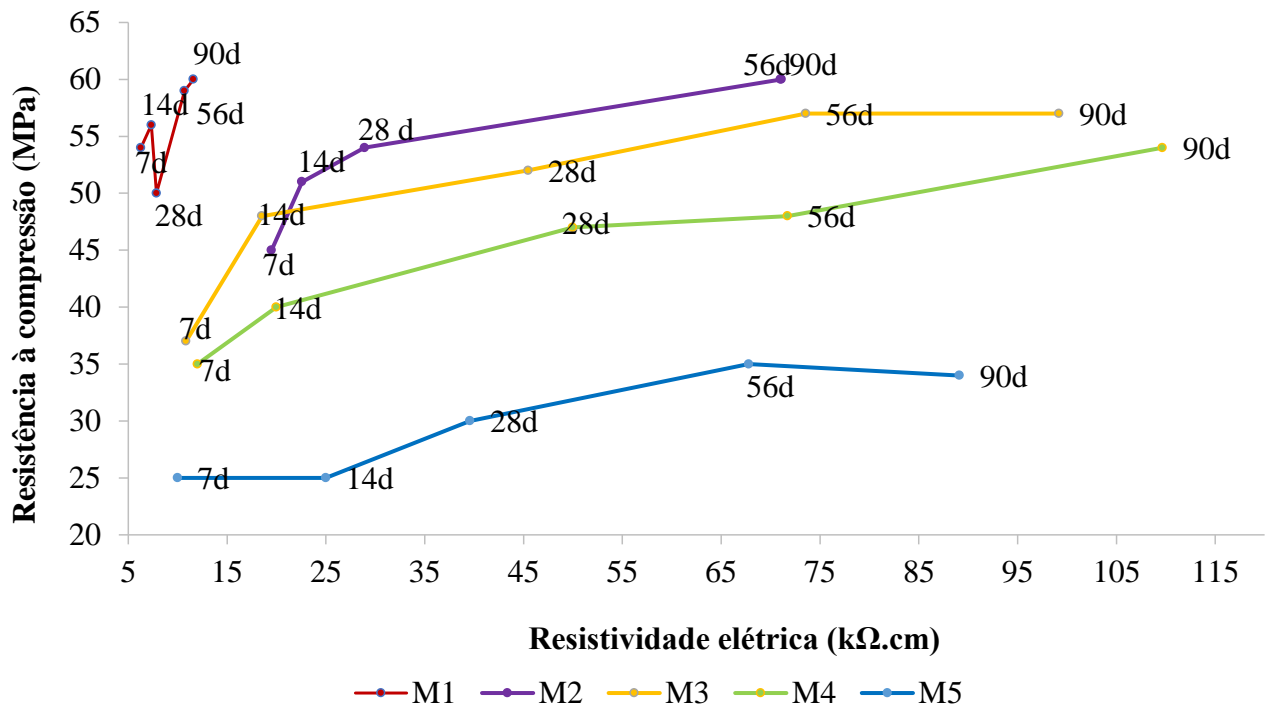


Figura 6. Resistividade elétrica vs. resistência mecânica à compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5 obtidas nas idades de 7, 14, 28, 56 e 90 dias

De acordo com a Fig. 6, o traço M1 apresentou valores de resistividade elétrica ascendente em relação à passagem do tempo, o valor inicial (7 dias) foi de 6 KΩ.cm e o final (90 dias) de 12 KΩ.cm. Quanto à resistência à compressão, a inicial foi de 54 MPa e a final de 60 MPa. Para este caso, embora tenha havido um aumento em ambos os parâmetros em relação ao tempo, não foi considerável como foi observado nos traços com teores de cinzas volantes ativadas (M2, M3, M4 e M5), onde ficou evidente que com o passar do tempo, a resistividade elétrica e resistência à compressão aumentaram. Este comportamento progressivo, nos traços com teores de cinzas volante, é atribuído ao benefício que a cinza volante proporciona na compactação do concreto em relação ao tempo.

Em todos os traços determinou-se que a evolução da resistividade é paralela à da resistência, comportamento também relatado por Andrade e D'Andrea (2011).

Considerando que a resistência mecânica à compressão considerada para um concreto durável deve ser de pelo menos > 45 MPa e uma resistividade elétrica > 50 KΩ.cm, as porcentagens que foram atingidas foram os traços com porcentagens de 30, 50 e 65% de CVA.

3.6 Velocidade de pulso ultrassônico vs. resistência mecânica

A Fig. 7 mostra o comportamento da compactação do concreto (VPU) em relação à resistência mecânica dos cinco traços após 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

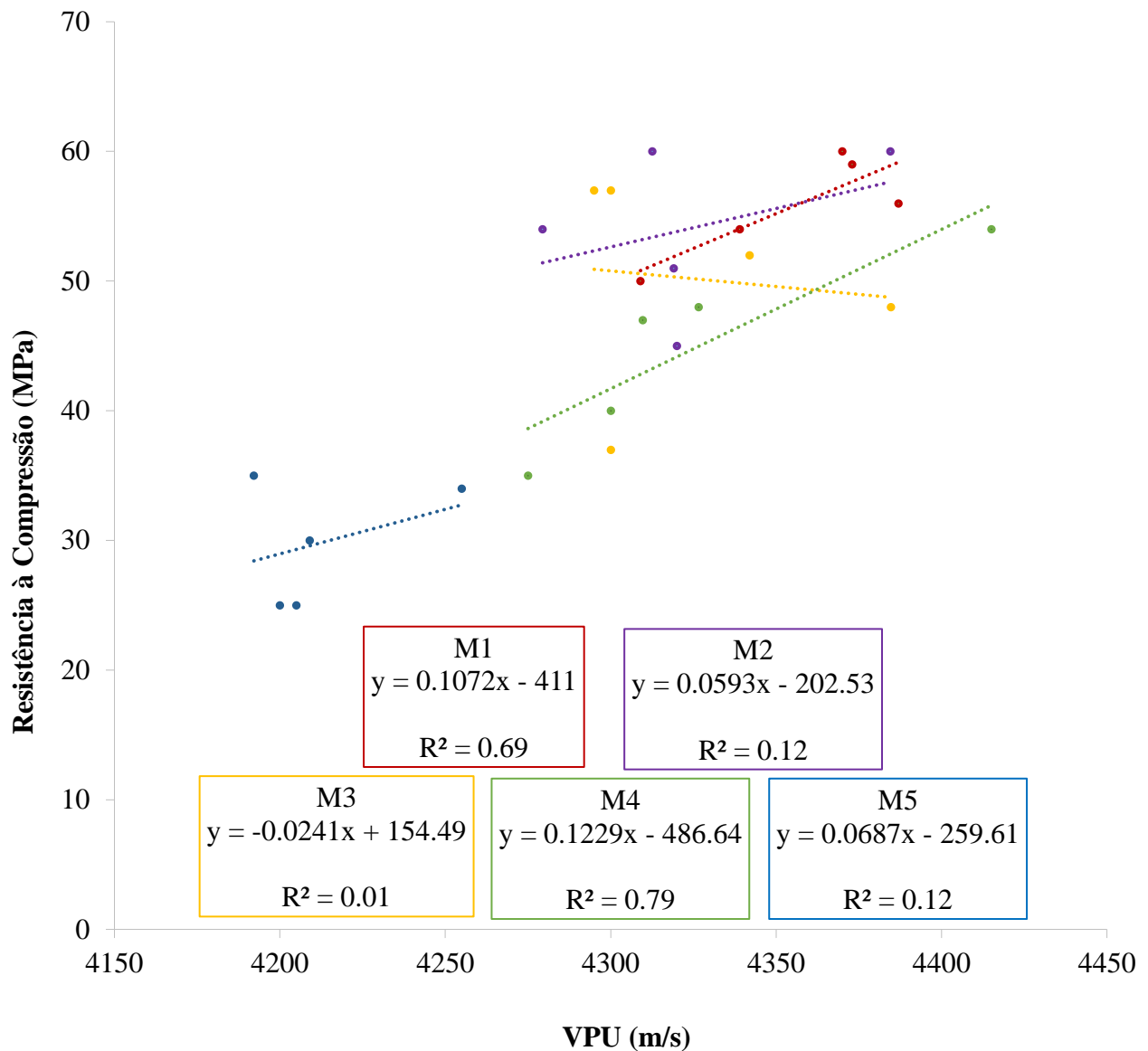


Figura 7. Velocidade de pulso ultrassônico vs. resistência mecânica de compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5 obtidas nas idades de 7, 14, 28, 56 e 90 dias

De acordo com a Fig. 7, observa-se que os traços M1 e M2 foram fixados em valores superiores a 4275 m / s e 45 MPa em todas as idades testadas. No caso de M3 e M4 em todas as idades os valores VPU foram superiores a 4275 m / s, mas a resistência à 7 dias foi inferior a 45 MPa, valor que foi aumentado ao longo do tempo. Apenas para o caso do traço M5, os valores de resistência e VPU foram mais baixos em comparação com os traços com e sem substituição de cinzas volantes ativadas, atribuído ao elevado teor de substituição de cinzas volantes (75%) e a baixa quantidade de hidróxido de cálcio (25% CPC 40). A partir destes resultados, observa-se que valores de VPU menores do que 4250 m/s as resistências mecânicas obtidas foram mais baixas do que 35 MPa (M5) e, quando os valores de VPU excederam 4250 m/s resistências foram maiores do que 35 MPa. No entanto, observa-se que os valores de R² indicam que a taxa de pulso ultrassônico e a resistência mecânica à compressão não são proporcionais, portanto, é necessário avaliar cada parâmetro de forma independente.

3.7 Resistividade elétrica vs permeabilidade rápida ao íon cloreto

A Fig. 8 mostra que a resistividade elétrica se correlaciona com a resistência à penetração dos cloretos. Observou-se que quanto maior a resistividade elétrica, menor o nível de permeabilidade. Os traços com teor de cinzas volantes ativadas superaram os valores de resistividade elétrica em relação àquelas obtidas com M1 (traço sem cinza volante ativada) e, como consequência, o nível de permeabilidade foi menor. Considerando que a resistividade do concreto aumenta com o tempo devido ao refinamento da estrutura do poro (Andrade et al., 2009), a presença de cinzas volantes favoreceu o refinamento da estrutura do poro, resultando em menor permeabilidade

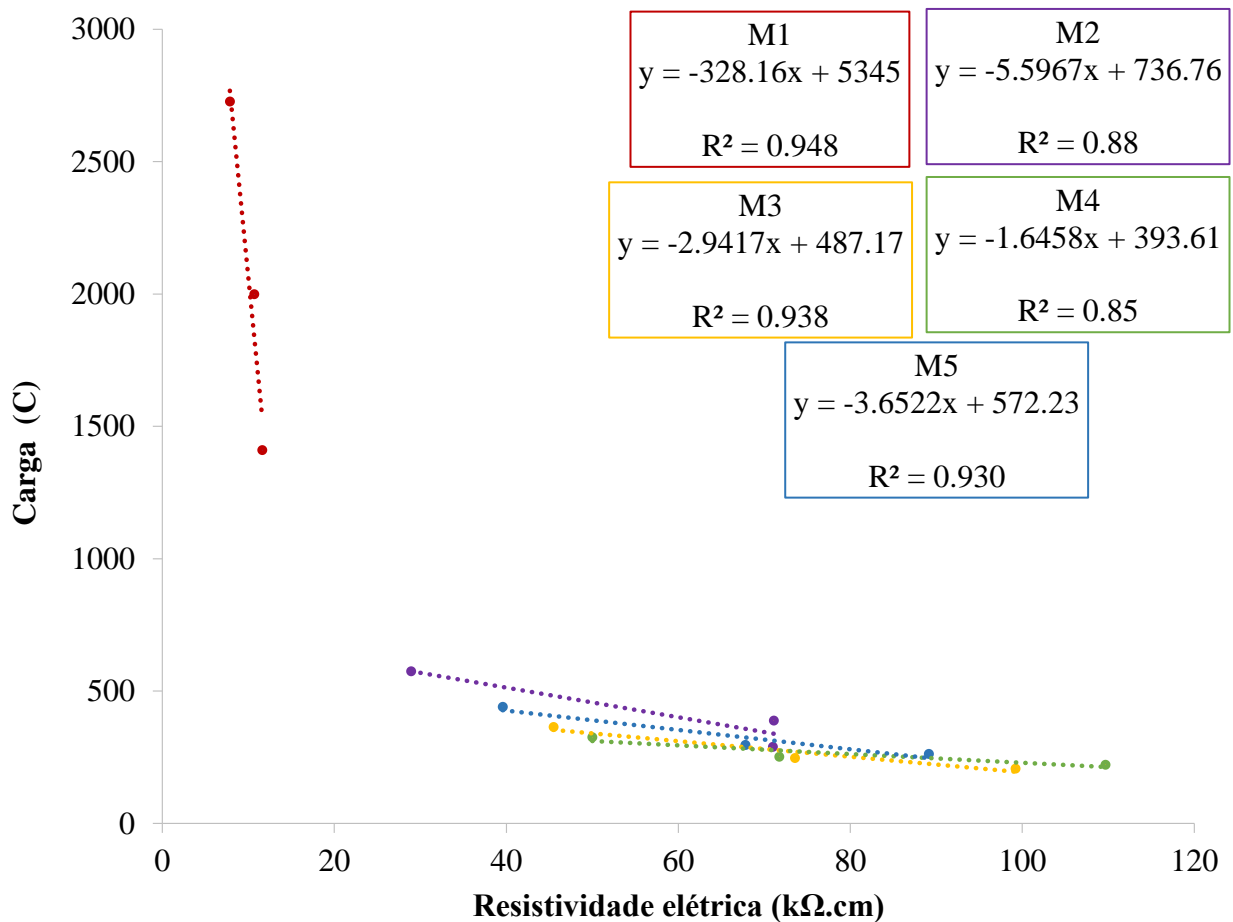


Figura 8. Resistividade elétrica vs permeabilidade rápida ao íon cloreto de M1, M2, M3, M4 e M5 obtidos nas idades de 28, 56 e 90 dias

4. CONCLUSÕES

1. O uso de cinzas volantes ativadas como material de substituição para o cimento Portland CPC 40 em traços de concreto favorece o aumento da resistividade elétrica, portanto, o transporte de agentes agressivos é muito menor do que no traço sem a adição de cinza volante ativada.
2. O nível de permeabilidade do íon cloreto nos traços de concreto com substituição de cinzas volantes foi muito baixo, isto expressa que a cinza volante, submetida a um tratamento químico e mecânico, é favorável para se atingir materiais que não são muito permeáveis a este íon, o que beneficia sua durabilidade.

3. O comportamento da resistência mecânica dos traços com porcentagens de 30, 50 e 65% de cinza volante ativada após 28 dias foi superior a 45 MPa, isso sugere que é possível fabricar concreto com desenvolvimento sustentável para o setor de a construção que não requer altas resistências em idades precoces.
4. O comportamento eletroquímico do aço da armadura incorporada nos traços descritos, a resistência aos sulfatos e a caracterização dos produtos de reação estão sendo estudados atualmente, resultados que serão relatados em trabalhos futuros

5. REFERÊNCIAS

- Al-Amoudi, O., Maslehuddin, M., and Asi, I. "Performance and Correlation of the Properties of Fly Ash Cement Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 71-77, DOI: <https://doi.org/10.1520/CCA10153J>. ISSN 0149-6123
- Andrade C., D'Andrea R., (2011), "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista ALCONPAT, V.1, No.2, pp. 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Andrade C., d'Andréa R., Castillo A., Castellote M. (2009), *The use of electrical resistivity as NDT method for specification the durability of reinforced concrete*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd
- ASTM International. (2002). *ASTM C597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- ASTM International. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0642-13>
- ASTM International. (2015). *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM International. (2015). *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- Chandra Debanath, O., Saiful Islam, Md., Moinul Islam, Md. (2015), "Use of Geopolymer Concrete as Green Construction Material- A Review", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE 2015) 26 – 29 November, 2015, Chittagong, Bangladesh
- Garcés, P., Zornoza, E., Baeza, F., Galao, O., Payá, J. (2012), "¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?", ALCONPAT, V.2, No.2, pp. 57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2 i2.27>
- Hela R., Orsáková, D., (2013), "The Mechanical Activation of Fly Ash", Procedia Engineering V.65, pp. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.016>
- Heidrich, C., Joachim Feuerborn H., Weir, A. (2013), "Carbon combustion products: a global perspective". World Conference of Coal Ashes, pp. 22-25. URL: <http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>
- Hemalatha T., Ramaswamy Ananth, (2017), "A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete", Journal of Cleaner Production, V.147, pp. 546-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Madhavi T. Ch., Swamy Raju L., Mathur Deepak, (2014) "Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete", Journal of Civil Engineering Research, V. 4, pp. 7-11. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201401.02.html>

- Lizarazo Marriaga, J., García, F., Higuera Flórez, C. (2015), “*Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química*”, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, V. 35, No.2, pp. 305-314. eISSN: 2244-7113
- Malhotra, V. M., (1990), “*Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash*”, Cement and Concrete Composites, Volume 12, Issue 4, Pages 271-277, DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90006-J)
- Malhotra V. M. (1985), “*Métodos no destructivos para evaluar concreto*”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Moffatt, E., Thomas, M., Fahim. A. (2017) “*Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment*”, Cement and Concrete Research, V.102, pp. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>
- Mehta K. (2001), “*Reducing the environmental impact of concrete*”, Concrete International, pp. 61-66. URL: <http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>
- Mehta, K. (2002), “*Greening of the concrete industry for sustainable development*”, Concrete international, 24 (7) pp. 23-28.
- Mishra, D. K., Yu, J., Leung, C. K. Y. (2017), “*Very high volume fly ash green concrete for applications in India*”, Global Waste Management, International Society of Waste Management, Air and Water. pp. 480-487.
- Mittal A., Kaisare M.B., Shetti R., “*Experimental Study on use of fly ash in concrete*”, Tarapur Atomic Power Project 3 & 4, Nuclear Power Corporation of India Limited URL: https://www.sefindia.org/forum/files/experimental_study_on_use_of_fly_ash_in_concrete_by_m_r_amit_mittal_136.pdf
- .Mucsi, G. (2016), “*Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review*”, Journal of Silicate Based and Composite Materials, V. 68, No. 2, pp. 56-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- Nath, P., Sarker, P. (2011) “*Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*”, Procedia Engineering V.14, pp. 1149-1156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- NMX-C-148-ONNCCE (2010) “*Industria de la Construcción-Cementos hidráulicos Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos*”.
- NMX C-083 (2014) “*Industria de la Construcción Concreto Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Método de Ensayo*”.
- NMX-C-159-ONNCCE (2016) “*Concreto, elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*”.
- NMX-C514 (2016) “*Industria de la Construcción Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico Especificaciones y Métodos de Ensayo*”.
- Palomo, A., Grutzeck, M., Blanco, M., (1999), “*Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*”, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 8, August, Pages 1323-1329, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- DURAR (1998), “*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*”, Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática Durabilidad de la armadura. 2a Edición
- International Energy Agency (2014), “*The Impact of Global Coal Supply on Worldwide Electricity Prices*”. Report by the IEA Coal Industry Advisory Board, pp. 55, URL: https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ImpactGlobalCoalSupply_WorldwideElectricityPrices_FINAL.pdf

- Saha, K. A. (2018) “*Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*”, Sustainable Environment Research, Volume 28, Issue 1, January, Pages 25-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Sahoo S., (2016), “*A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength*”, Journal of Basic and Applied Engineering Research, Volume 3, Issue 10; July-September 2016, pp. 883-887. e-ISSN: 2350-0255, <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html>
- Yu, J., Lu, C., Leung C. K. Y., Li, G. (2017). *Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash*. Construction and building materials, 147, pp. 510-518. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- Zobal, O., Reiterman P., Plachý, T., Bittnar, Z. (2017), “*Durability of Concrete with Fly Ash from the Dam Orlik after 55 Years*”, Advanced Materials Research, V.1144, pp. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1144.81>

Reuso de efluentes na fabricação de blocos de concreto para alvenaria de vedação

A. Plaza Meurer¹ , R. Alves Amorim¹ , L. Carvalho Quintanilha¹ , D. Cardoso Parente^{*1,2} 

* Autor de Contato: denisparente@yahoo.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.278>

Recepção: 26/10/2017 | Aceitação: 29/05/2018 | Publicação: 30/04/2019

Editor Associado Responsável: Dr. Paulo Helene

RESUMO

Este trabalho busca avaliar a utilização da água de reuso proveniente de estações de tratamento de esgoto na fabricação de blocos vazados de concreto simples. O uso desses blocos tem sido adotado como opção de racionalização na composição da alvenaria de vedação e estrutural, por permitir redução nas perdas de materiais e camadas de revestimento. Fabricados a partir da mistura de aglomerante, agregado e água, em média 60 m³ de concreto, necessários para produção de 12.350 blocos (14 x 19 x 39 cm), consumiria 4.500 l de água. O estudo compreende a análise das propriedades físicas e mecânicas dos blocos dosados com efluente e os resultados mostram que essas propriedades permanecem inalteradas, o que pode viabilizar a utilização do efluente.

Palavras-chave: água de reuso; bloco de concreto; efluente tratado.

Citar como: Plaza Meurer, A., Alves Amorim, R., Carvalho Quintanilha, L., Cardoso Parente, D. (2019), "Reuso de efluentes na fabricação de blocos de concreto para alvenaria de vedação", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 215 – 227, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.278>

¹ Universidade Federal do Tocantins - UFT, Brasil.

² Centro Universitário Luterano de Palmas - CEULP/ULBRA, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Effluent reuse in the manufacture of concrete blocks for sealing masonry

ABSTRACT

This work seeks to assess the use of reuse water from sewage treatment stations in the manufacture of simple concrete hollow blocks. The use of these blocks has been adopted as a rationalization option in the composition of the sealing and structural masonry, providing a reduction in the losses of materials and layers of coating. Made from the mixture of agglomerate, aggregate and water, around 60 m³ of concrete, required for the production of 12,350 blocks (14 x 19 x 39 cm), would consume 4, 500 l of water. The study includes the analysis of the physical and mechanical properties of effluent dosed blocks. Consequently, the results show that these properties remain unchanged, which can make the effluent use viable.

Keywords: reusing water; concrete block; treated effluent.

Reutilización de efluentes en la fabricación de bloques de concreto para albañilería

RESUMEN

En este trabajo se evalúa la utilización del agua de reutilización proveniente de estaciones de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de bloques huecos de concreto simple. El uso de esos bloques ha sido adoptado como opción de racionalización de la composición de la albañilería para mampostería tradicional y estructural, por permitir reducción de pérdidas de materiales y capas de revestimiento. Fabricados a partir de la mezcla de aglomerante, agregado y agua, en promedio 60 m³ de concreto, necesarios para la producción de 12.350 bloques (14 x 19 x 39 cm), consumiría 4.500 l de agua. El estudio comprende el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los bloques dosificados con el efluente y los resultados muestran que esas propiedades permanecen inalteradas, lo que puede viabilizar la utilización del efluente.

Palabras clave: reutilización del agua; bloque de concreto; aguas residuales tratadas.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Visvanathan e Asano (2001), o desenvolvimento industrial descontrolado provocou o esgotamento e a poluição dos recursos hídricos, se tornando necessário regulamentações cada vez mais rigorosas que forcem as indústrias a reduzirem o consumo de água potável. O autor ainda afirma que os avanços tecnológicos possibilitam o tratamento de águas residuais para uma diversidade de reutilizações industriais.

Outro ponto relevante é a reutilização da água, que se apresenta como uma das soluções para enfrentamento da crise hídrica. Segundo dados do World Bank (2015), aproximadamente 90% da água residual de países em desenvolvimento tem sua disposição no meio ambiente sem nenhum tratamento. O Banco Mundial ainda ressalta que na América Latina cerca de três quartos das águas contaminadas com coliformes fecais, voltam para o corpo hídrico, provocando graves problemas de saúde pública e para o meio ambiente.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar e comparar as propriedades físico-mecânicas de blocos de concreto confeccionados com água potável e blocos fabricados por meio da utilização de efluente doméstico tratado pela ETE Vila União, localizada em Palmas - TO.

2. BLOCO VAZADO DE CONCRETO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define bloco vazado de concreto simples como “componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta” (ABNT NBR 6136:2014, p. 1).

Na produção de blocos de concreto é utilizado o concreto seco, também conhecido como concreto sem abatimento (MARCHIONI, 2012). Este concreto se diferencia do concreto convencional (plástico) em determinadas propriedades como: consumo de cimento, granulometria das misturas e trabalhabilidade. A resistência dos concretos secos não segue à risca a Lei de Abrams, aplicada aos concretos plásticos. (FRASSON JR. e PRUDÊNCIO JR., 2002).

Entre as vantagens do uso de blocos vazados estão o menor consumo de argamassa na execução da alvenaria; a possibilidade de serem cheios com barras de aço e graute alcançando capacidade de suportar cargas estruturais; e a utilização de suas cavidades para passagem de instalações elétricas e hidrossanitárias, que evita o corte na alvenaria, fator este que contribui para redução de resíduos e para o aumento da produtividade.

Por terem tolerâncias dimensionais muito pequenas geram uma redução acentuada na aplicação de revestimento em relação ao bloco cerâmico (SANTOS, 2016). O bloco de concreto por apresentar maior aderência, em relação ao bloco cerâmico, exige menos revestimento. Outra vantagem é com relação a perda de material, tendo em vista que os blocos de concreto não quebram tanto quanto aos cerâmicos (HOMETEKA, 2016).

3. PROCEDIMENTO

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram fabricados blocos de concreto com efluente tratado, coletado no mês de julho de 2016, proveniente da ETE Vila União, localizada em Palmas – Tocantins.

3.1. Coleta do efluente tratado

A coleta do efluente para a análise química foi realizada na ETE Vila União, onde o tratamento é realizado por reatores de fluxo ascendente (UASB), lagos de lodo ativado e decantadores. A coleta manual foi realizada no dispositivo medidor de vazão do emissário de efluente tratado da estação.

O procedimento referente à amostragem em águas superficiais e coleta manual foi realizado conforme especificações da NBR 9898:1987 e do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (2011) da CETESB.

3.2. Análise de efluente tratado

Os ensaios para avaliar a água de reúso foram divididos nas seguintes etapas: avaliação preliminar, análise química, tempo de pega da pasta e resistência à compressão da argamassa.

A etapa de avaliação preliminar compreendeu a realização dos seguintes ensaios especificados na Tabela 1, realizados no Laboratório de Química Geral da Universidade Federal do Tocantins – UFT.

Tabela 1. Avaliação preliminar

Parâmetro	Norma
Óleos e gorduras	ABNT NBR 15900-3
Detergentes	
Cor	
Material sólido	
Odor	
Ácidos	
Matéria orgânica	

As análises químicas foram realizadas pelo laboratório MICROLAB Ambiental de Goiânia – GO e contemplaram os ensaios e normas especificados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise química

Ensaio	Norma
Cloretos	ABNT NBR 15900-6
Sulfatos	ABNT NBR 15900-7
Álcalis	ABNT NBR 15900-9
Fosfatos	ABNT NBR 15900-8
Nitratos	ABNT NBR 15900-10
Chumbo	ABNT NBR 15900-5
Zinco	ABNT NBR 15900-4

Conforma procedimentos da NBR NM 45 e NBR NM 65 foram realizados ensaios para determinação dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento com efluente tratado. A norma de água para amassamento de concreto (NBR 15900) fala que os tempos de início e fim de pega da pasta, em amostras de pasta preparada com a água em estudo, não devem diferir mais de 25% dos tempos de início e fim obtidos com amostras preparadas com água destilada.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 e 28 dias de cura dos corpos de prova de argamassa, segundo os procedimentos da NBR 7215. Conforme NBR 15900, a resistência média, para as duas idades, deve alcançar pelo menos 90% da resistência à compressão média de corpos de prova preparados com água potável.

3.3. Fabricação dos blocos

A etapa seguinte foi a fabricação dos blocos vazados de concreto para alvenaria de vedação utilizando efluente tratado e água potável. A Tabela 3 apresenta o traço utilizado na fabricação dos blocos.

Tabela 3. Traço do concreto para fabricação dos blocos

Traço em massa (cim. : pó de seixo : água)	Material	Unidade	Quantidade
1 : 9,250 : 0,325	Cimento	Kg	40
	Pó de seixo	Kg	370
	Água	L	13

Para a fabricação dos blocos, utilizou-se o cimento CP II Z 32, fabricante CIPLAN, proveniente do mercado local (Palmas-TO). Os materiais utilizados na mistura do concreto com água potável resultaram em um volume de 0,17 m³ de concreto e a produção de aproximadamente 35 blocos. O

mesmo volume de concreto com efluente tratado foi produzido, resultando em aproximadamente 35 blocos.

3.4. Ensaio para blocos

Foram realizados os ensaios de análise dimensional, absorção e área líquida no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins. E o ensaio de resistência à compressão de blocos e prismas no Laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA – TO). Os procedimentos seguiram as normas NBR 6136 e NBR 12118.

O ensaio de resistência à compressão de prismas foi realizado conforme procedimentos da norma NBR 15961. Conforme o referido procedimento foi adotados prismas de dois blocos como um dos elementos que podem ser utilizados para estimar a resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural. Apesar dos blocos serem para alvenaria de vedação realizou-se o ensaio de resistência à compressão de prismas com dois blocos para se obter uma melhor compreensão da transmissão de cargas de um bloco para outro.

A tabela 04 apresenta o traço em volume e a relação água/cimento da argamassa utilizada para assentar os blocos na montagem do prisma.

Tabela 4. Traço em volume da argamassa

Traço em volume (cim. : areia)	Relação água/cimento
1 : 0,5	1,4

4. RESULTADOS E DICUSSÕES

4.1. Avaliação preliminar do efluente

Após coleta do efluente foi realizada a avaliação preliminar do efluente com relação aos parâmetros óleos, gorduras, detergentes, cor, material sólido, odor, ácidos e matéria orgânica, de acordo com as recomendações normativas da NBR 15900-1:2009. Nessa avaliação os ensaios foram feitos a partir de análises qualitativas, com exceção do ensaio de material sólido que foi quantificado o teor presente na amostra. Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5. Resultados da avaliação preliminar do efluente

Parâmetro	Resultado	Requisito
Óleos e gorduras	Sem traços visíveis	Não mais do que traços visíveis
Detergentes	Presença de espuma	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min
Cor	Amarelo claro	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser amarelo claro ou incolor
Material sólido	391 mg/L	Máximo de 50.000 mg/L
Odor	Inodora e sem odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico	Água deve ser inodora e sem odor de sulfeto de hidrogênio, após a adição de ácido clorídrico
Ácidos	pH 8	pH ≥ 5
Matéria orgânica	Solução da amostra mais clara que a solução-padrão	A cor da água deve ser mais clara ou igual à da solução-padrão, após a adição de NaOH

Apesar da água de reúso proveniente de ETE não atender o parâmetro “ausência de espuma”, é permitido o uso do efluente tratado como água de amassamento desde que sejam atendidos os critérios sobre tempo de pega e resistência à compressão apresentados no item 4.4 da NBR 15900-1:2009.

Ainda sobre os resultados apresentados na Tabela 5, o pH do efluente tratado apresentou resultado dentro do permitido e tinha uma coloração de amarelo claro. Além disso, o efluente no teste de odor apresentou resultado inodoro e sem odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico.

Com relação ao parâmetro “óleos e gorduras” não foram encontrados traços visíveis. Também através de análise visual, no parâmetro “matéria orgânica”, a solução da amostra foi mais clara que a solução-padrão. E o teor de material sólido foi inferior ao teor máximo.

4.2. Análise química do efluente

Ensaio quimicamente, segundo as recomendações normativas apresentadas na Tabela 6, a fim de identificar a presença ou não de substâncias deletérias ao concreto, estão quantificados os teores de cloretos, sulfatos, álcalis, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco.

Tabela 6. Resultados da análise química

Substância	Teor (mg/L)	Teor máximo (mg/L)	Uso final	Método
Cloretos	75	500	Concreto protendido ou graute	ABNT NBR 15900-6
		1.000	Concreto armado	
		4.500	Concreto simples (sem armadura)	
Sulfatos	64	2.000	-	ABNT NBR 15900-7
Álcalis	295	1.500		ABNT NBR 15900-9
Fosfatos	6,036	100		ABNT NBR 15900-8
Nitratos	0,02	500		ABNT NBR 15900-10
Chumbo	<0.01	100		ABNT NBR 15900-5
Zinco	0,081	100		ABNT NBR 15900-4

Algumas substâncias, tidas para Battagin (2010) como alteradoras da resistência à compressão e do tempo de pega, foram encontradas em níveis mínimos na amostra de efluente. Para o autor nitratos de zinco, chumbo e manganês retardam a pega, enquanto nitratos de cromo promovem sua aceleração. Em contrapartida, os fosfatos e boratos de chumbo e zinco reduzem a taxa de hidratação, prolongam o tempo de pega e abreviam a evolução da resistência inicial.

4.3. Tempo de pega

Ainda nos ensaios previstos para água de amassamento foi realizado o ensaio de tempo de pega, de acordo com a NBR 15900-1:2009. Segundo os critérios da norma foi avaliada a aprovação ou não da água de reúso como insumo na fabricação dos blocos. Na Figura 1 são apresentados os tempos de início e fim de pega da pasta com água destilada e com efluente tratado.

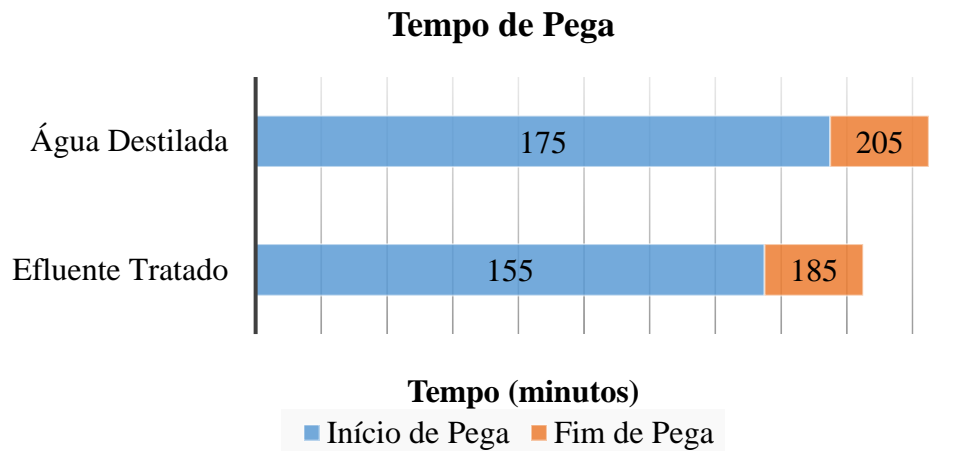


Figura 1. Resultados referentes aos tempos de início e fim de pega

Percebe-se que os tempos de início e fim de pega das amostras de pasta preparadas com efluente tratado não divergiram mais que 25% das produzidas com água destilada, atendendo ao exigido pela NBR 15900-1:2009. O efluente divergiu 11,43% para início de pega, e 9,76% para fim de pega.

4.4. Resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão axial da argamassa foram utilizados 4 corpos de prova de cada amostra aos 7 e 28 dias de idade, em um total de 16 corpos de prova ensaiados. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resistência à compressão do corpo de prova de argamassa

Resistência à compressão (MPa)				
Corpo de prova	Água destilada		Efluente Tratado	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
1	18,90	24,69	16,68	24,04
2	15,65	21,82	19,87	19,49
3	19,00	24,69	17,00	22,20
4	19,17	26,26	16,79	22,74
Média	18,18	24,37	17,59	22,12
D.P.	1,69	1,85	1,53	1,91
C.V. (%)	9,30%	7,60%	8,70%	8,66%

A resistência média à compressão dos corpos de prova de argamassa com efluente tratado, aos 7 dias e 28 dias, alcançou mais de 90% da resistência à compressão média dos corpos de prova preparados com água destilada, atendendo o exigido pela NBR 15900-1:2009. Aos 7 dias se teve um alcance de 96,75%, e com 28 dias o alcance foi de 90,77%.

Por meio do teste de hipótese “t” de Student, comprovou-se que a resistência média da argamassa com água destilada e da argamassa com efluente tratado tiveram entre si valores significativamente semelhantes, para um nível de confiança de 95%.

4.5. Absorção e área líquida dos blocos

Foram utilizados três blocos para cada amostra (Bloco A e B). O resultado da determinação da absorção e área líquida dos blocos convencionais podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8. Determinação da absorção e área líquida dos blocos convencionais

Corpo de prova	Absorção		Área líquida	
	Individual (%)	Média (%)	Individual (mm ²)	Média (mm ²)
1	10,71%	10,50%	25.000,00	25.000,00
2	10,26%		24.736,84	
3	10,53%		25.263,16	

A Tabela 9 mostra os resultados da determinação da absorção e área líquida dos blocos com efluente tratado.

Tabela 9. Determinação da absorção e área líquida dos blocos com efluente tratado

Corpo de prova	Absorção		Área líquida	
	Individual	Média	Individual (mm ²)	Média (mm ²)
1	10,48%	10,66%	26.052,63	25.789,47
2	10,68%		25.789,47	
3	10,84%		25.526,32	

O requisito da NBR 6136:2014 para o ensaio de absorção em blocos, com uso de agregado normal, é de absorção individual menor ou igual a 12% e absorção média menor ou igual a 10%. Os resultados mostram que ambas as amostras de blocos apresentaram absorção média superior ao limite máximo aos 28 dias de cura. Para Fernandes (2012), um bloco produzido com quantidade de água insuficiente para a perfeita compactação ou produzido com composição granulométrica muito grossa geralmente apresenta uma superfície porosa, sujeita a absorver água com facilidade. Haja vista que a distribuição granulométrica utilizada para confecção dos blocos permite um bom acabamento das peças, acredita-se que provavelmente a quantidade de água adicionada na mistura não foi suficiente para produzir peças com pouca porosidade, mediante o grau de compactação utilizado. O alto teor de materiais pulverulentos pode ter aumentado o consumo de água devido à alta superfície específica de finos.

4.6. Ensaio de resistência à compressão dos blocos

Para o ensaio de resistência à compressão axial foram utilizados 6 blocos de cada amostra (convencional e efluente tratado) aos 14 e 28 dias de idade, em um total de 24 blocos ensaiados. Os resultados são apresentados na Tabela 10, e mostram um comparativo entre as resistências médias das amostras.

Tabela 10. Resultado da resistência à compressão

Bloco	Resistência à compressão (MPa)			
	Convencional		Efluente Tratado	
	14 Dias	28 Dias	14 Dias	28 Dias
1	2,28	3,16	3,61	3,58
2	1,87	3,43	3,04	5,03
3	2,03	3,26	3,11	4,20
4	2,53	3,17	3,00	3,53
5	2,43	3,09	4,96	3,54

6	2,40	3,09	2,05	4,80
Média	2,26	3,20	3,29	4,11
D.P.	0,26	0,13	0,96	0,67
C.V. (%)	11,30%	4,05%	29,19%	16,40%

A resistência média à compressão dos corpos de prova de argamassa com efluente tratado, aos 7 dias e 28 dias, alcançou mais de 90% da resistência à compressão média dos corpos de prova preparados com água destilada, atendendo o exigido pela NBR 15900-1:2009. Aos 7 dias o alcance da resistência foi de 96,75%, e com 28 dias de 90,77%, apresentando entre si valores significativamente semelhantes, para um nível de confiança de 95%.

Para classificação dos blocos quanto à sua devida classe deve-se tomar como referência a resistência à compressão característica estimada ($F_{bk,est}$). Os valores do $F_{bk,est}$ do bloco convencional e do bloco com efluente tratado estão apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11. Resultado da resistência à compressão dos blocos convencionais

Corpo de prova	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistência à compressão (MPa)		$F_{bk,est}^a$	F_{bk}^b
		Individual	Média		
1	17.584	3,16	3,20	3,03	3,03
2	19.122	3,43			
3	18.154	3,26			
4	17.640	3,17			
5	17.222	3,09			
6	17.224	3,09			

^a Resistência à compressão característica estimada da amostra expressa em MPa
^b Resistência característica à compressão expressa em MPa ($F_{bk,est} \geq \Psi.F_{b1}$)

Fonte: Autor, 2016

Tabela 4. Resultado da resistência à compressão dos blocos com efluente tratado

Corpo de prova	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistência à compressão (MPa)		$F_{bk,est}^a$	F_{bk}^b
		Individual	Média		
1	19.937	3,58	4,11	3,49	3,49
2	27.994	5,03			
3	23.406	4,20			
4	19.646	3,53			
5	19.709	3,54			
6	26.745	4,80			

^a Resistência à compressão característica estimada da amostra expressa em MPa
^b Resistência característica à compressão expressa em MPa ($F_{bk,est} \geq \Psi.F_{b1}$)

Fonte: Autor, 2016

Ambas as amostras de blocos atenderam às especificações de resistência para blocos da Classe C, F_{bk} maior ou igual a 3 MPa especificados no item 6.5 da NBR 6136:2014.

Os blocos feitos com efluente tratado apresentaram resistência média e resistência característica maior que os blocos produzidos com água potável, com ganho de resistência à compressão para um nível de confiança de 95%.

Levando-se em conta que o processo de fabricação, o traço e a cura foram os mesmos para as duas amostras, então acredita-se que esse aumento de resistência se deu devido à algum problema na moldagem dos blocos (realizada na fábrica), haja vista que no ensaio de resistência à compressão da argamassa o resultado foi diferente.

Os blocos com efluente apresentaram maior compactidade (empacotamento das partículas) e maiores resistências. Na Tabela 13, pode-se comprovar que a amostra de blocos com efluente tratado apresentou maior densidade que os blocos da outra amostra.

Tabela 13. Densidade dos blocos

Massa (kg)	Volume (m ³)	Densidade (Kg/m ³)	Densidade Média (Kg/m ³)
Blocos convencionais			
9,80	0,00480	2041,67	2017,36
9,75		2031,25	
9,50		1979,17	
Blocos com efluente tratado			
10,50	0,00480	2187,50	2149,31
10,30		2145,83	
10,15		2114,58	

Fonte: Autor, 2016

Fernandes (2014) afirma que para um melhor controle tecnológico recomenda-se estabelecer a peça desejada, e obter o seu peso adotando-o como padrão numa faixa de variação de no máximo 5%, para mais ou para menos. O estabelecimento do peso padrão para as peças e o controle de peso logo após a extrusão é método mais eficiente e praticado para controle do desvio padrão da resistência, seja em diferentes lotes, seja entre ciclos de uma mesma mistura ou até mesmo entre peças da mesmas bandejas.

4.7. Resistencia a compressão de primas

O ensaio de resistência a compressão simples realizado com prismas de 3 blocos de cada amostra com 28 dias, totalizando 6 prismas não grauteados apresentou valores de resistência à compressão e valores de fator de eficiência prisma/bloco detalhados na Tabela 14.

Tabela 14. Resistência à compressão simples das primas

Carga máxima de ruptura (Kgf)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Eficiência (fpm/fbm)
Prisma Convencional					
11.687	2,10	2,30	0,37	16,01%	71,97%
11.600	2,08				
15.199	2,73				
Prisma com efluente tratado					
16.012	2,88	3,15	0,25	7,94%	76,47%
17.779	3,19				
18.755	3,37				

Observou-se em todos os prismas que a ruptura ocorreu por tração no bloco causando fissuração vertical, iniciada e intensificada nas paredes longitudinais e algumas vezes nas paredes transversais. As linhas vermelhas apresentadas na Figura 3 demarcam as fissuras nos prismas.



Figura 3. Ruptura típica dos prismas

A eficiência é convencionalmente definida como a relação entre a resistência de um elemento, por exemplo um prisma, e a resistência do bloco que o compõe. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), o fator de eficiência f_{pm}/f_{bm} varia de 0,50 a 0,90. Para as duas amostras foram encontrados valores acima de 0,70 de eficiência prisma/bloco, estatisticamente semelhantes pelo teste de hipótese “t” de Student, para um nível de confiança de 95%.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das análises da água de reuso e os dados de resistência a compressão, início e fim de pega podem confirmar a não interferência do uso do efluente na composição dos blocos. Todos os resultados atenderam aos critérios de tempo de pega e resistência à compressão para água de amassamento para concreto estabelecidos pela NBR 15900-1:2009.

Quanto a verificações dimensionais dos blocos moldados, verificou-se que as áreas líquidas médias das duas amostras de blocos apresentaram percentual em torno de 45% da área bruta do bloco, atendendo aos requisitos de valores menores que 75%, exigido pela NBR 6136:2014. Ambas as amostras apresentaram aspectos dimensionais semelhantes estatisticamente, não interferindo o efluente na estabilidade dimensional das peças.

Sobre a absorção dos blocos, os resultados médios obtidos para as duas amostras foram acima do limite máximo apresentado por norma. O alto teor de materiais pulverulentos deve ter aumentado o consumo de água, fazendo a quantidade de água ser insuficiente para mistura e conseqüentemente formar um concreto poroso

6. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996), *NBR 7215: 1996, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987), *NBR 9898: 1987, Preservação e técnicas de amostragem de afluente líquidos e corpos receptores – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), *NBR NM 45:2006, Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-1:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 1: requisitos*. Rio de Janeiro.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-2:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 2: coleta de amostras para ensaios*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-3:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 3: avaliação preliminar*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-4:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 4: análise química – Determinação de zinco solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-5:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 5: análise química – Determinação de chumbo solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-6:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 6: análise química – Determinação de cloreto solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-7:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 7: análise química – Determinação de sulfato solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-8:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 8: análise química – Determinação de fosfato solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-9:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 9: análise química – Determinação de álcalis solúveis em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-10:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 10: análise química – Determinação de nitrato solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 15900-11:2009, Água de amassamento do concreto – Parte 11: análise química – Determinação de açúcar solúvel em água*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), *NBR 15961-1:2011, Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: projeto*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), *NBR 15961-2:2011, Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 2: execução e controle de obras*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 6136:2014, Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), *NBR 12118:2013, Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.
- AMN - Asociación Mercosur de Normalización (2002), *NM 65:2002, Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro.
- Frasson Jr, A.; Oliveira, A. L.; Prudêncio Jr., L. R. (2002), *Influência do processo produtivo nas resistências dos blocos de concreto*. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, PR, maio, 8 p.
- CETESB - ANA (2011), *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Agência Nacional de Águas, Organizadores: Carlos Jesus Brandão [et al.], Autores: Adriana Castilho R. de Deus [et al.], São Paulo; Brasília.
- Hometeka, *Bloco de concreto x bloco cerâmico na alvenaria estrutural*. Disponível em: <<http://goo.gl/zqavdD>>. Acesso em: 01 set. 2016.
- Marchioni, M. L. (2012), “*Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada*”, 111 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

- da Silva Battagin, I. L. (2010), “A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto: uma contribuição para a sustentabilidade”, *Concreto & Construção*, São Paulo, v. 58, p.37-45, abr.-jun. 2010. Disponível em: <http://goo.gl/F4xWZb>, Acesso em: 01 set. 2016.
- Ramalho, M. A.; Corrêa, M. R. S. (2003), “*Projeto de edifícios de alvenaria estrutural*”, 1 ed. São Paulo: PINI.
- SANTOS, A. (2011), *Bloco de concreto começa a virar o jogo*. Disponível em: <http://goo.gl/d9LP02>, Acesso em: 01 set. 2016.
- Visvanathan, C., Asano, T. (2001), *The Potential for Industrial Wastewater Reuse*. Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO Publication. Disponível em: <http://goo.gl/HDq4TH>, Acesso em: 01 set. 2016.
- World Bank (2015), *Brasil, Colômbia e Peru lideram lista de países com mais água no mundo*. Disponível em: <http://goo.gl/F3j1AC>, Acesso em: 01 abr. 2016.

Inspeção ao convento de Santa Clara de Asís em Havana. Estudo do seu estado de conservação e propostas de intervenção

J. L. Guevara^{1*} , Y. A. Toirac¹ , C. M. C. Marisy¹ 

* Autor de Contato: jlopezg@civil.cujae.edu.cu

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>

Recepção: 26/10/2017 | Aceitação: 29/05/2018 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

As treliças do Coro alto do Convento de Santa Clara de Assis têm sido vítimas da umidade, do ataque de agentes bióticos e abióticos que causaram sua degradação gradual. Para a identificação dos processos patológicos associados a esses agentes e pelo seu caráter patrimonial, foi realizado um estudo diagnóstico baseado em inspeção organoléptica e ensaios superficiais com os instrumentos disponíveis, que permitiram identificar o problema e fazer um diagnóstico. Modelando a estrutura no programa SAP 2000, foram encontradas as solicitações as quais os elementos estruturais estão submetidos. Com isso foi proposta a solução dos problemas patológicos, principalmente a intervenção para corrigir a perda do vínculo entre a viga e o tirante.

Palavras-chave: processos patológicos; caráter patrimonial; inspeção organoléptica; ensaios superficiais; modelar.

Citar como: Guevara, J. L., Toirac, Y. A., Marisy, C. M. C. (2019), “*Inspeção ao convento de Santa Clara de Asís em Havana. Estudo do seu estado de conservação e propostas de intervenção*”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 228 – 246, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echevarría, La Habana, Cuba

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

An approach to the convent of Santa Clara de Asís in Havana. Study of its conservation status and intervention proposals

ABSTRACT

Santa Clara de Asis Convent High Choir timber truss has been victim of humidity and attack of abiotic and biotic agents which have caused its gradual degradation. For the identification of pathological processes associated with these agents and because of its patrimonial character, a diagnosis study based on an organoleptic inspection and superficial tests was carried out with the available instruments, which allowed identifying the causes. By modeling the structure with SAP 2000 program, we obtained the results that were used to calculate the solutions proposed for the identified pathologies, mainly for the loss of connection between the wall plate and the tie rod beam.

Keywords: pathological processes; patrimonial character; organoleptic inspection; superficial tests; modeling.

Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención

RESUMEN

La armadura del Coro alto del Convento de Santa Clara de Asís ha sido víctima de la humedad, y del ataque de agentes bióticos y abióticos que han provocado su paulatina degradación. Para la identificación de los procesos patológicos asociados a estos agentes y por su carácter patrimonial se realizó un estudio de diagnóstico basado en una inspección organoléptica y en ensayos superficiales con el instrumental disponible, que permitieron identificar las causas. Mediante la modelación de la estructura en el programa SAP 2000 se obtuvieron las solicitaciones a las que se encuentran sometidos los elementos a intervenir y con el resultado se calcularon las soluciones propuestas para las patologías identificadas, fundamentalmente para la pérdida del vínculo entre la solera y el tirante.

Palabras clave: procesos patológicos; carácter patrimonial; inspección organoléptica; ensayos superficiales; modelación.

1. INTRODUÇÃO

Em Havana, iniciou-se um projeto de resgate do convento de Santa Clara de Asis, em Havana Velha, para ligar o passado, o presente e o futuro deste edifício longevo, através de um processo de conservação, preservação e reabilitação do patrimônio herdado pela humanidade, para que seja integrado na vida contemporânea.

O convento localizado no Centro Histórico da capital cubana, com seu coro alto como visto na "Figura 1", era, pelo dizer de Pedro Herrera "a primeira estrutura não militar de escala monumental que foi construída em Havana, quando o cenário urbano da cidade velha sofreu uma transformação definitiva" (López, 2006)



Figura 1. Igreja do convento de Santa Clara, ao fundo o Coro alto.

As treliças de pares do primeiro claustro do convento de Santa Clara são considerada a mais antiga preservada em Havana Velha e quanto a esse tipo de telhado, o melhor exemplo para suas soluções não convencionais. Essas estruturas, devido à sua composição, foram expostas ao ataque de agentes externos, sejam eles bióticos ou abióticos, que agem de forma agressiva, causando sua degradação. Com esta investigação é feito um estudo do atual estado de deterioração apresentado pela treliça do coro alto do convento e propostas de técnicas de intervenção, tradicionais ou atuais, visando recuperar e melhorar a capacidade estrutural das estruturas de madeira do convento de Santa Clara de Assis, sendo uma obra do século XVII e considerada Patrimônio Cultural da Humanidade com grau de proteção 1, concedida pelos regulamentos urbanos da Velha Havana. Este sistema construtivo representa uma herança valiosa. Conservá-lo contribui ao resgate da identidade cultural da nação.

2. TRELIÇAS DE MADEIRA MAIS ANTIGAS PRESERVADAS NA VELHA HAVANA

Em seu artigo *As treliças dos pares em Havana Velha*. O privilégio de sua conservação, a Dr. Felicia Chateloin afirma que "o convento de Santa Clara pode ser considerado o exemplo mais importante da construção de Havana em que as treliças de pares foram usadas. Seu estudo é importante, não apenas pela idade, qualidade e variedade de seus telhados, mas também pelo número, não igualado por nenhum outro edifício "(Santiesteban, 2007).

No primeiro claustro destacam-se os tetos em caixotões que cobrem a maior parte dos recintos em seu andar superior, e se distinguem pela elegância das proporções, bem como pelo tamanho de seus principais elementos, os da nave da igreja e seu coro "(Espiniella, 2001, Arduengo e Cruz, 2012). Em Cuba, a maioria dos telhados inclinados de madeira do período colonial é descendente da treliça de origem mudéjar. Por muito tempo autores como Joaquín Weiss (Weiss, 1978) referiram-se a este tipo de treliça como alfarjes, mas Felicia Chateloin chama a atenção para o erro ao usar este termo nas treliças de pares, "hoje reconhecemos que este termo deve se restringir aos tetos planos decorados, devem ser corretamente denominados 'treliça de pares' pelo seu sistema estrutural. Foi a treliça de pares, e não os alfarjes, que caracterizaram os telhados e tetos da Havana colonial dos séculos XVII e XVIII "(Santiesteban, 2007).

2.1 Caracterização construtiva e estrutural da treliça do coro alto da igreja

O teto do coro superior consiste em pares ou alfordas, ver "Figura 2" em série de dois que começam do estribo, marco perimetral da estrutura e atingem a viga de fileira ou cumeeira formando quatro abas. De acordo com os critérios de especialistas (Santiesteban, 2007), em salas com vãos maiores que 10 m, os pares terão uma seção aproximada de 14 x 17 cm. As alfordas são unidas horizontalmente, a dois terços da altura, pelas juntas determinando o harneruelo, pelo que o perímetro interior do teto é um trapézio. Por esta última característica pode ser classificada como uma treliça de par e junta e como um conjunto estrutural trabalhado à compressão. "Nestes tetos a fileira não está à vista e pode ou não se apoiar em transversinas. A junta tem uma seção de dimensões iguais ou muito semelhantes às do par de sua treliça "(Santiesteban, 2007)



Figura 2. Elementos estruturais da treliça do coro alto do convento.

Os pares são apoiados nas paredes por meio do estribo, marco estrutural do sistema, em templos religiosos sua seção pode ter 35 x 30 cm ou mais, é responsável por receber os esforços horizontais transmitidos pelos pares (Santiesteban, 2007). Para enrijecer a estrutura, o estribo é travado com vigas transversais ou 'tirantes' que trabalham à tração e formam um triângulo junto com os pares, essas vigas de seção 15 x 20 cm aproximadamente são unidas por pequenos pedaços chamados ligaduras, constituindo o que se denomina tirantes pareados, veja "Figura 3", no espaço entre elas e metade do vão apresenta um polígono estrelado com função decorativa. O objetivo dos tirantes pareados geralmente é fazer a amarração das soleras que são constituídas por tramos.



Figura 3. Tirantes paralelos.

Nos ângulos do local, na "Figura 4", observam-se os "quadrados", que estão unidos ao estribo, que têm uma função de enrijecimento e, como os tirantes, trabalham à tração (Santiesteban, 2007). Os quadrados estão dispostos a 45 ° (Matauco, 2000). As molduras que suportam os quadrados são esculpidos paralelamente às paredes adjacentes, o que torna as frentes mais visíveis.



Figura 4. Cuadrado, apoio transversal e apoio de canto.

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA O DIAGNÓSTICO

A metodologia realizada para o estudo das manifestações patológicas na treliça foi feita a partir do estudo de metodologias propostas por diferentes autores (Álvarez et al., 2005); (Basterra et al., 2005); (Garófalo, 2000); (Otaño, 2002); (Rodríguez, 2006). "Uma análise integral do problema, abordará sempre a análise do ambiente próximo ao edifício, os problemas e suas manifestações deformativas e sua incidência casuística. A conservação ou proteção necessária vai desde o prédio para a cidade e desta para aquela, como todo processo que funciona como um sistema "(Otaño, 2002).

A metodologia diagnóstica definida por esses autores consiste em três etapas fundamentais, primeira: caracterização do objeto de estudo, segunda: inspeção organoléptica e terceira: exames superficiais. Na primeira etapa é feita uma primeira abordagem ao trabalho, busca e revisão bibliográfica para coletar informações sobre os antecedentes do edifício, características do sistema e seus componentes. A segunda etapa consiste no reconhecimento da propriedade e seu entorno, com base em uma inspeção organoléptica rigorosa e detalhada que permite estabelecer o estado geral de conservação da estrutura; a inspeção será apoiada por esboços nos quais foram elaborados eixos de coordenadas para melhor delimitar as áreas das instalações e facilitar a descrição e representação subsequentes das manifestações patológicas identificadas. Também será acompanhado de documentação fotográfica para demonstrar a manifestação patológica referida. Na terceira etapa, as técnicas e instrumentos para a realização de ensaios não destrutivos são definidos para permitir uma análise mais detalhada dos processos patológicos que estão ocorrendo na estrutura. Nesta etapa são avaliados parâmetros ambientais que podem influenciar as manifestações patológicas observadas, ensaios in situ são realizados como a medida da umidade ambiental, superfície dos elementos e temperatura, no laboratório é realizada a identificação anatômica das espécies e dos organismos xilófagos. Este diagnóstico final é feito com o objetivo de confirmar ou rejeitar as hipóteses elaboradas na segunda etapa.

Para realizar o diagnóstico, a numeração dos elementos que compõem a estrutura do Coro alto é mostrada nos esboços da "Figura 5". A enumeração dos pares foi realizada de forma independente em cada retalho; enquanto os componentes foram definidos de acordo com a articulação que correspondia em cada caso e foi contada a partir do início da treliça nas paredes na direção da aresta. Os apoios, quadrados, arquivos e vigas de tirante (elementos que podem ser observados na "Figura 6") foram enumerados consecutivamente a partir dos elementos localizados na intersecção dos eixos B'-1, e no sentido de rotação. no sentido horário, veja "Figura 5".

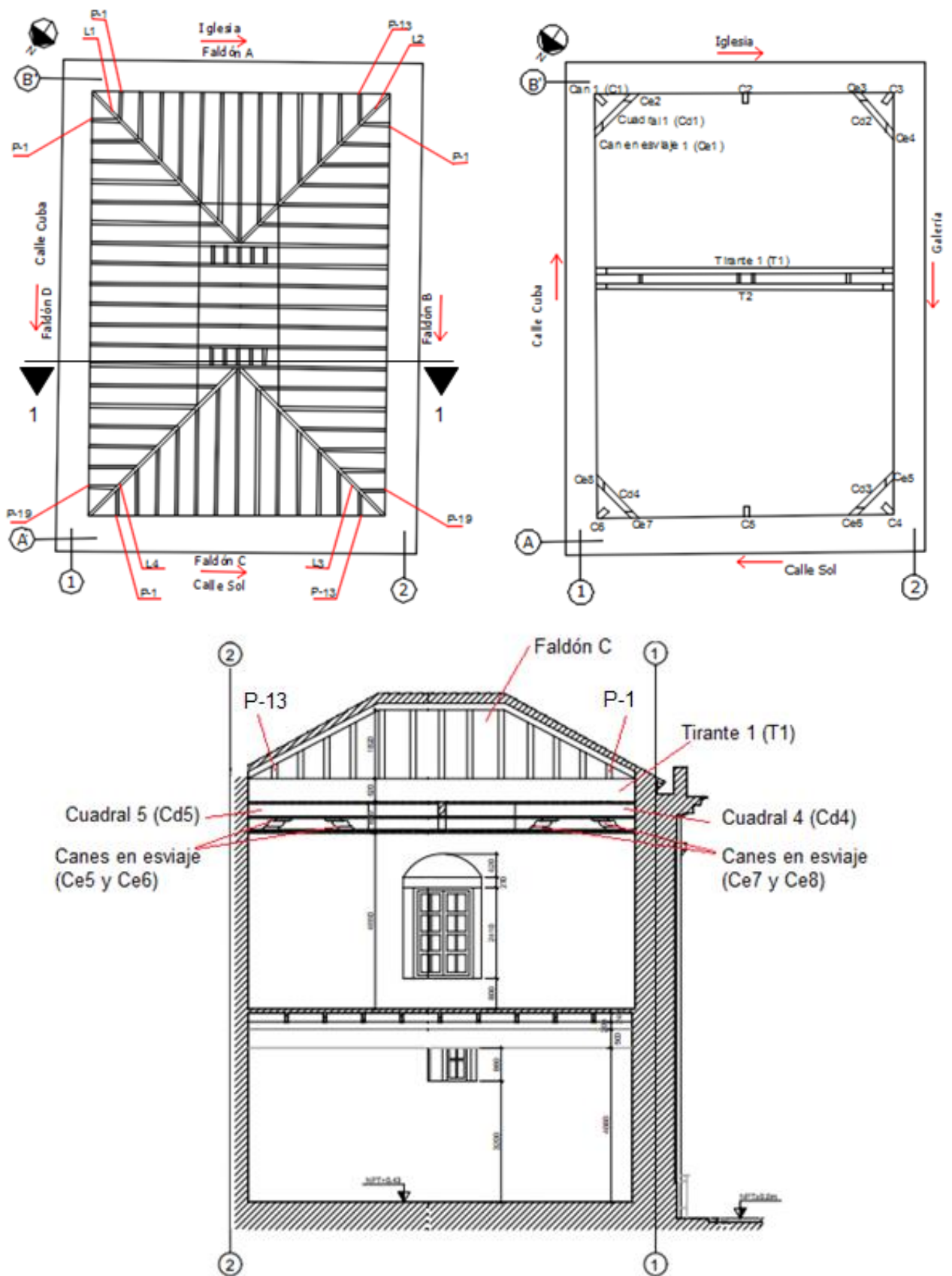


Figura 5. Nomenclatura e numeração dos elementos do coro alto no plano arquitetônico e na seção transversal 1-1.

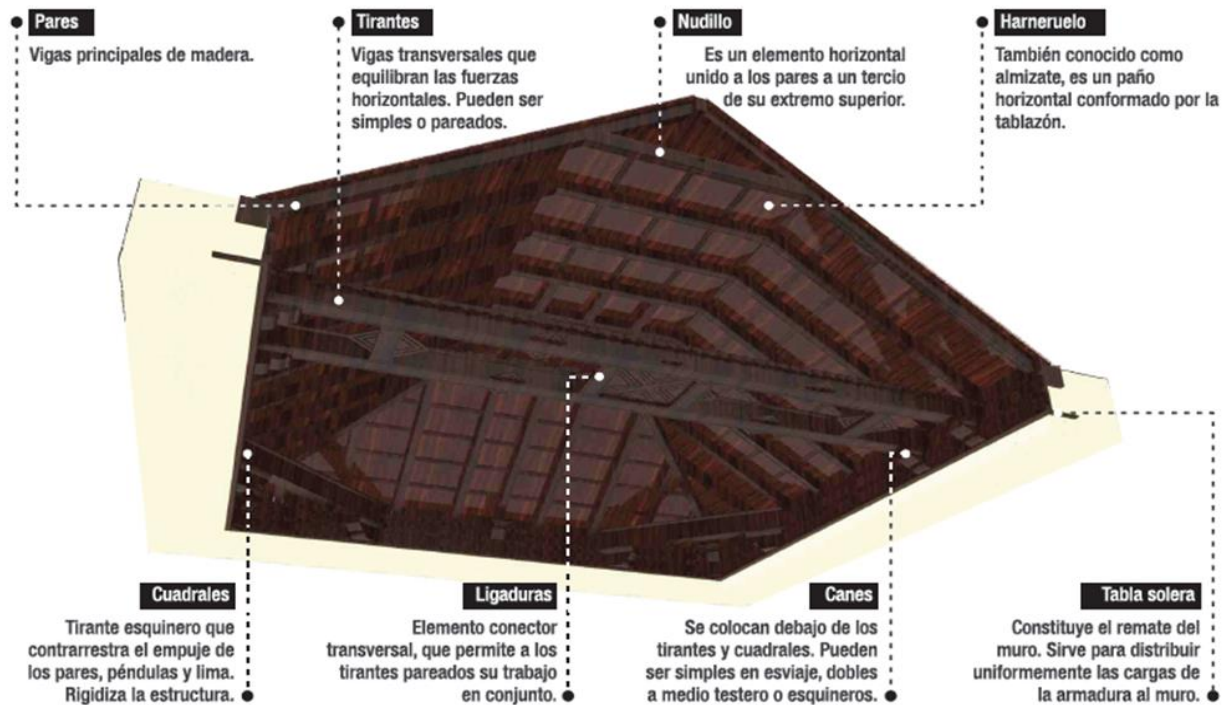


Figura 6. Elementos componentes do par e da treliça da junta do coro alto. (Autores: Arq Dayana Espinosa Ruiz Arq Arq Lillian Potts e Linnet Valdés Rodríguez Rivero)

3.1 Inspeção visual do coro alto

A primeira inspeção à estrutura mostrou o evidente abandono a que está sujeita e o nível de deterioração devido à ausência de manutenção. A sujeira pode ser vista nas paredes como resultado do acúmulo de poeira, fuligem e matéria orgânica, como resultado da proximidade da Avenida del Puerto e da passagem de veículos motorizados pelas ruas circundantes.

Uma alta umidade ambiental é percebida no local. Além disso, verificou-se que a construção foi exposta por períodos prolongados à água em excesso devido a vazamentos do telhado, que se evidencia por fungos verdes e manchas de escuridão nas paredes, ver "Figuras 7-10". Estas infiltrações podem causar sérios danos à madeira, acelerando o processo de putrefação e nas paredes de taipas, devido ao fato de que, pela sua própria constituição, tendem a reter muita umidade.



Figura 7 e Figura 8. Fungos na parede da galeria no eixo 2 do Coro.



Figura 9. Parede no eixo A com escorrimentos



Figura 10. fungos verdes no eixo 2.

Devido à proliferação de plantas hospedeiras na cobertura, desenvolveram sistemas de raízes que penetram nas paredes de taipas, veja a "Figura 11", e podem influenciar na sua fissuração.



Figura 2. Raízes do eixo A das plantas hospedeiras na cobertura.

Os grupos de morcegos que estão no teto das instalações, veja a "Figura 12", colaboraram para a sujeira das paredes e das instalações em geral com seus excrementos e restos de comida, veja "Figura 13". Embora o desempenho desses quirópteros em algumas situações seja benéfico para os seres humanos, como a manutenção e a regeneração de florestas, tendo um papel importante na dispersão de sementes, eles podem se tornar uma praga quando instalados em locais que não constituem seu habitat Natural.

Os excrementos de morcegos contêm ácidos que produzem problemas nas paredes de natureza estética, devido ao seu acúmulo. Além disso, eles podem afetar a saúde humana criando um ambiente propício ao desenvolvimento de uma sucessão ecológica completa de microrganismos, começando com o crescimento de bactérias, fungos e finalmente a proliferação de insetos xilófagos.



Figura 12. Presença de morcegos.



Figura 13. Sujeira nas paredes produto de excrementos de morcego e no local produto dos restos de sua comida.

Fissuras e rachaduras verticais são observadas, variando entre 1-2 cm de espessura e uma profundidade de 3-4 cm, especialmente nas juntas entre paredes, veja "Figura 14". Essas fissuras podem ser o resultado de um acidente, causado pelo empuxo da estrutura de madeira, já que fissuras horizontais também são mostradas na parte inferior da parede, veja "Figura 15".



Figura 3. Fissura de 2 cm de abertura na intersecção dos eixos A-1

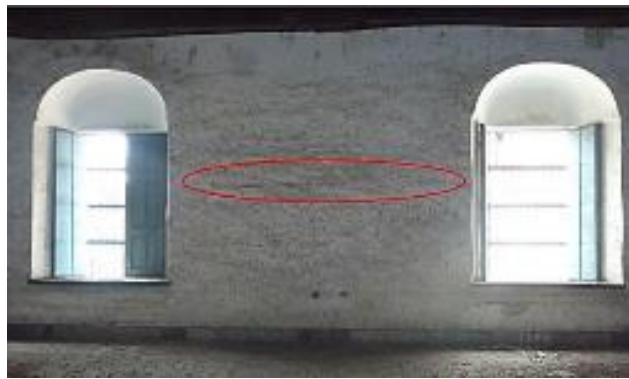


Figura 4. Fissuras horizontais na parte inferior da parede (eixo 1).

Por se tratar de um material de origem orgânica, a madeira é exposta ao ataque de diferentes agentes, tanto bióticos como abióticos, que influenciam na sua degradação e na perda de sua resistência na maioria dos casos. Os agentes abióticos são do tipo físico e / ou químico e são causados por fenômenos climáticos ou meteorológicos, como radiação solar, umidade, chuva, vento, entre outros (Colectivo de autores, 1998).

Segundo a Corporação Chilena de Madeira (CORMA), para o desenvolvimento e subsistência de agentes biológicos, são necessárias certas condições, como a existência de fonte de alimento para nutrir, uma faixa de temperatura ideal para seu desenvolvimento entre 3°C e 50°C, sendo ótimo em torno de 37°C. Para que a madeira seja suscetível ao ataque de fungos, a umidade deve oscilar entre 20% e 140%, pois abaixo de 20%, o fungo não pode se desenvolver, e acima de 140% de umidade, não há oxigênio suficiente para que ele possa viver. Com as condições descritas acima, a madeira é exposta ao ataque biológico, e alterações significativas podem ocorrer na resistência mecânica da madeira ou na sua aparência.

A ligação entre o tirante e o peitoril é o ponto mais crítico, pois seu mau funcionamento traz desalinhamentos ao telhado e a entrada de água (Garófalo, 2000, Rodríguez, 2003). Ocasionalmente, empuxos são produzidos na parede causados pelo tirante desprendido, dando

origem a fissuras horizontais que surgem a uma certa altura, mais visíveis no interior, acompanhadas por um deslocamento para fora das fiadas superiores. Nas imagens, veja "Figuras 16-19", se mostra a descida dos apoios que suportam os tirantes e os quadrados, a causa dessa deterioração pode estar associada à presença de umidade que causou a podridão dos elementos de tirante localizados dentro da parede, os elementos pararam de funcionar como antes e começaram a ceder. No caso dos apoios que suportam os tirantes, pode-se associar, além disso, à força que estão exercendo os tirantes.



Figura 16. Deslocamento do apoio sob o tirante 2 (T2), no eixo 2.



Figura 17. . Deslocamento de apoios sob os tirantes 1 e 2 (T1 e T2), no eixo 1.



Figura 18 e Figura 19. Deslocamento de apoios enviesados (Ce7 e Ce8) sob o quadrado 4 (Cd4).

3.2 Exame da estrutura de madeira do coro alto

Contou-se com o apoio do Grupo de diagnóstico do Escritório do Historiador para a realização dos ensaios de nível I e II (Rodríguez, 2006), que complementaram o estudo organoléptico realizado e permitiu um conhecimento mais próximo da real condição da estrutura. Como parte deste estudo, os seguintes ensaios foram realizados: medição das dimensões dos elementos que compõem o telhado (nível I), medição da umidade superficial, temperatura e umidade (nível I), sondagem com perfuração dos elementos de madeira (nível I), identificação de plantas superiores (nível I) e identificação anatômica da madeira (nível II) (laboratório).

Dimensionamento dos elementos.

Para determinar as esquadrias dos pares que compõem a estrutura de madeira e o espaçamento entre elas, uma vez que os projetos originais não estão disponíveis, foi utilizada uma linha como elemento de medição. As medições foram feitas no lado lateral e inferior dos elementos. A medição do espaçamento foi feita a partir da face interna dos pares. O esquema das medidas tomadas para esses elementos é mostrado na "Figura 20"

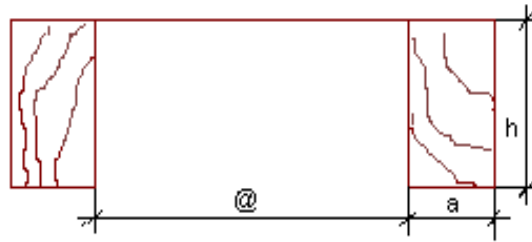


Figura 20. Forma de medir os pares

A Tabela 1 mostra a quantidade de elementos que a estrutura contém, bem como as faixas nas quais as dimensões das seções transversais oscilam de acordo com o tipo de peça e seu espaçamento.

Tabela 1. Dimensionando os elementos da estrutura de madeira do Coro alto.

Elemento	Quantidade	Seções		Espaçamento (@)	
		Largura (a)	Altura (h)		
Limas	4	17 cm	20-22 cm	-	
Pares	64	17 cm	20-22 cm	45-58 cm	
Quadrados	4	23-24 cm	30-31 cm	-	
Apoios	10	-	-	-	
Apoios enviesados	8	-	-	-	
Tirantes simples	2	T1	24.5 cm	31.5 cm	80 cm
		T2	22.5 cm	31.5 cm	

Umidade relativa e temperatura ambiente.

Os valores de umidade relativa foram medidos com termo-higrómetro, ver “Figura 21”, foram feitas leituras em diferentes pontos do local, controlados durante três meses (de Março a Maio de 2018) de modo que se possibilitou obter as possíveis variações nas leituras feitas, que evidenciam diferenças atmosféricas dentro do mesmo local. Os valores medido em todos os casos, são maiores do que 65% e as condições termohigrométricas são adequadas, isto é, existem no local temperaturas entre 20°C e 30°C, que favorecem o desenvolvimento de agentes de biodegradação e ajuda a acelerar os ciclos de vida de inúmeros microrganismos e insetos xilófagos que degradam a madeira.

Umidade da superfície.

O ensaio de umidade superficial permite conhecer o teor de umidade retido nas fibras do material, já que seu valor influencia as propriedades físicas do mesmo. Para a execução do ensaio, foi utilizado o Higrómetro Protimeter Surveymaster SM como equipamento, consulte "Figuras 22 e 23".



Figura 5. Termo-higrômetro.



Figura 6. Higrômetro Protimeter Surveymaster SM.



Figura 7. Medição da umidade superficial dos elementos.

O equipamento possui dois modos de medição: pela cor da barra de LED e pela leitura da porcentagem (%) de umidade contida na madeira. De acordo com a cor na barra, será verde quando estiver em um estado seguro de secagem ao ar, o amarelo representa a borda e vermelho quando a madeira estiver em uma condição desfavorável. A classificação dos níveis de saturação estabelecida pelo fabricante é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Níveis de saturação estabelecidos pelo fabricante.

Cor	Nível de saturação da umidade superficial	Faixa de valores (%)
Verde (V)	Semi seco	6-8-10
Amarelo (A)	Umidade admissível	12-14
Vermelho (R)	Úmido	16-18-20
	Saturado	> 20

As medidas foram feitas nos pares, nas áreas próximas ao tirante e nos elementos mais expostos à umidade, registrando cinco leituras em cada medição. Para executá-lo, o equipamento é pressionado a uma profundidade nominal de 5-15 mm no elemento estudado e fornece leituras de umidade relativa contidas no material.

Valores superiores a 18% foram detectados em áreas específicas que confirmam a presença de umidade devido a vazamentos no telhado, que é uma das causas fundamentais dos problemas observados. Estas umidades na faixa de 18 a 20% e superiores criam um ambiente favorável para o crescimento de fungos e de outros organismos xilófagos que pode afetar as propriedades mecânicas da madeira.

No caso dos elementos onde foram encontrados problemas e não excederam estes valores, pode-se inferir que houve fases onde o aumento da umidade tem sido considerável, permitindo assim o aparecimento de agentes degradantes de madeira.

Sondagem com perfuração dos elementos de madeira.

O objetivo do presente ensaio é determinar a condição dos pares na área perto dos tirantes, conforme a medida obtida pela penetração de um perfurador graduado, ver "Figura 24". Este valor depende das características e da dureza específica do elemento de madeira que está sendo analisado. Quando a punção não penetra ou o faz superficialmente, isso significa que o elemento estudado está em boas condições. No entanto, valores mais altos de penetração (entre 2-5 cm) são obtidos se os elementos estiverem podres ou desfibrados. O resultado deste ensaio mostra que as lesões mais comuns identificadas são: desfibramento na região da cabeça dos pares e quadrados, na parte inferior e nas laterais de 70% dos pares que formam as abas do telhado, e outras lesões como fissuras, podridão, lascas e manchas de umidade.



Figura 24. Sondagem de elementos de madeira com punção graduada.

A "Figura 25" resume as lesões detectadas no Coro Alto, colocando-as em uma planta arquitetônica.

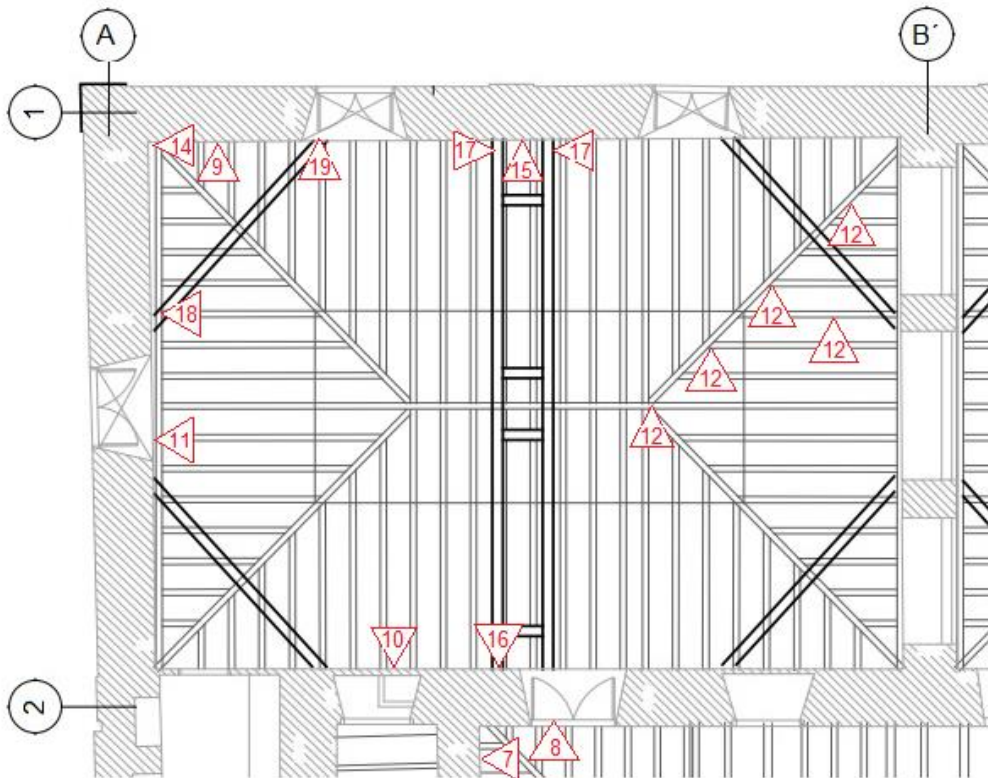


Figura 25. Planta arquitetônica do Coro Alto, onde estão localizadas as lesões associadas às Figuras 7-12 e 14-19.

Identificação de plantas superiores.

Foram tiradas fotografias das plantas hospedeiras que estão crescendo na cobertura, veja "Figuras 26 e 27". A identificação das plantas superiores foi realizada através da comparação com espécies presentes no herbário do laboratório de Biologia do Grupo Diagnóstico do Escritório do Historiador de Havana, a família botânica, o vernáculo e o nome científico foram obtidos (Coletiva de Autores, 1999); (Roig, 2014) e comportamento biológico (Pérez e Rodríguez, 2007); (Pérez, 2010)



Figura 26 e Figura 27. Plantas invasoras no telhado do Coro Alto.

As plantas identificadas são de porte herbáceo e de porte arbóreo, estes últimos têm raízes que podem penetrar paredes e produzir fissuras que continuam a desenvolver, alargando e criando novas tensões dentro das paredes (Perez, 2010).

As plantas de porte herbáceo, embora a sua ação mecânica é de menor incidência do que as de porte arbóreo, também desempenham um papel no desenvolvimento de lesões, pois contribuem para a deterioração química do substrato no qual crescem e a retenção de umidade, facilitando o crescimento de outras plantas com maior potencial. Portanto, é necessário saber a qual espécie ou grupo pertence o agente biológico, a partir da qual são traçadas as estratégias para a conservação do substrato deteriorado.

Identificação da espécies das madeiras.

Para realizar este ensaio, amostras aleatórias dos elementos de madeira foram retiradas para sua identificação, a fim de obter cortes histológicos nas direções transversal, tangencial e radial. A observação dos caracteres anatômicos foi feita com o uso de microscópio óptico de luz.

As amostras foram identificados pelo método da anatomia comparativa, que é baseada na comparação entre a morfologia macroscópica das amostras com madeiras padrões, previamente identificadas e classificadas na xiloteca do laboratório de Biologia do Instituto do Historiador. Os caracteres avaliados são: cor, textura, grão, brilho e odor (nas amostras que o possuem) e presença de anéis de crescimento (Carreras e Dechamps, 1995). As amostras foram retiradas da quadra 4, do apoio e da saia D; sendo obtido que o apoio enviesado 4, o friso da saia D e o arrocabe pertencem à espécie *Cedrela odorata*, ver "Figura 28" e a quadra4 pertence à espécie *Tectona grandis*, ver "Figura 29".

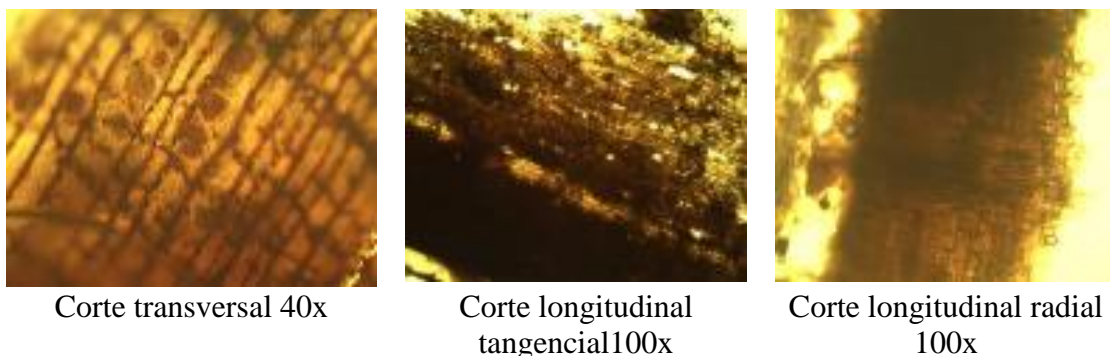


Figura 8. Cortes anatômicos da *Cedrela odorata*.

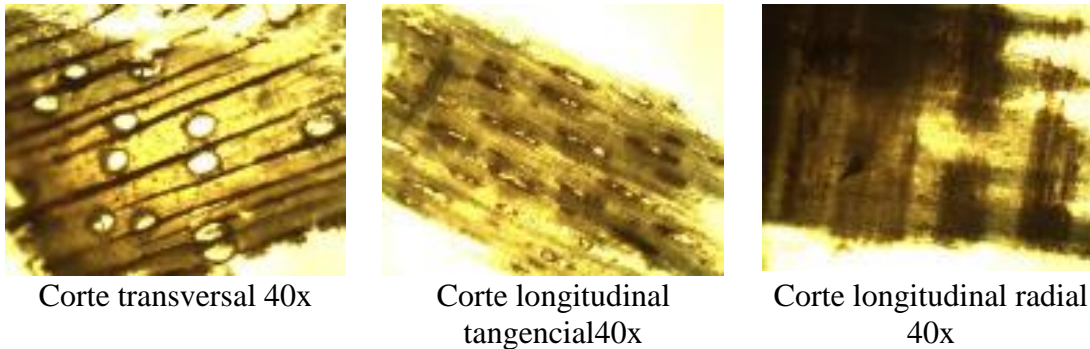


Figura 9. Cortes anatômicos da *Tectona grandis*.

Os cortes histológicos das amostras tomadas, nos sentidos transversal, longitudinal-tangencial e longitudinal-radial, que podem ser observados nas Figuras 28 e 29, permitem corroborar a partir da microscopia, de acordo com o padrão de parênquima da seção transversal, que é melhor apreciado que o parênquima radial, que as espécies madeireiras são cedro e teca, respectivamente. Uma vez identificadas as espécies, a Tabela 3 mostra suas propriedades físico-mecânicas, com base nas informações fornecidas pelo Instituto de Pesquisas Agroflorestais de Cuba, que serão utilizadas na modelagem estrutural no programa SAP 2000 e no cálculo dos reforços.

Tabela 1. Principais características mecânicas e físicas das madeiras identificadas.

Nome científico	Nome vulgar	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (kg/cm ² x1000)	Tração (kg/cm ²)	Flexão (kg/cm ²)	Compressão (kg/cm ²)		Cortante (kg/cm ²)
						Normal às fibras	Paralela às fibras	
Cedrela odorata	Cedro	0,37-0,75	78.10	690	667	-	302	40
<i>Tectona grandis</i>	Teca	0,61-0,74	110	850	1160-1450	-	513-685	63.2

4. VERIFICAÇÃO DAS CARGAS ATUANTES NOS TIRANTES

A estrutura foi modelada no programa SAP 2000, veja "Figura 30", levando em consideração para a análise das cargas o próprio peso dos materiais (NC 283: 2003), a carga de uso de cobertura (NC 284: 2003) e carga de vento (NC 285: 2006) de acordo com as combinações de carga da NC 450: 2006.

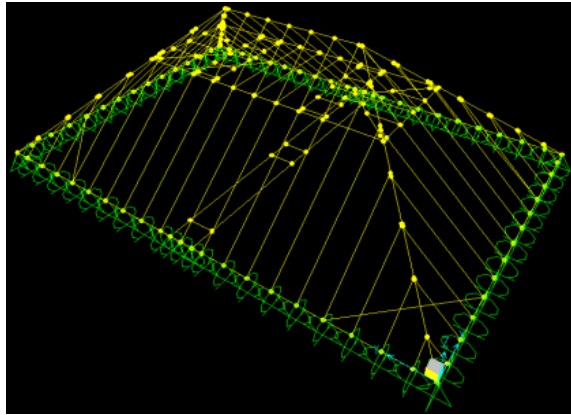


Figura 30. Modelo da estrutura no programa SAP 2000.

Resultados de modelagem para as tensões axiais no tirante 1: $NT1 = 60,15 \text{ kN}$ e no tirante 2: $NT2 = 52,49 \text{ kN}$, obtido da combinação mais desfavorável.

5. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

5.1 Solução para tirantes

Consiste em substituir a parte retirada da madeira, através da introdução de barras (aço ou de CPRF) em furos realizados na madeira e proceder à colagem das barras para que se adiram bem. Para o projeto foi considerada a tensão máxima axial, para ambos os tirantes, da combinação mais desfavorável obtida a partir da modelagem realizada no programa SAP 2000. Os diâmetros dos furos deve ser grandes o suficiente para deixar uma folga de cerca de 3 a 6 mm da barra, que será preenchida com epóxi.

Processo de execução: corte com motosserra ou serra da parte degradada da cabeça. Abertura de furos no tirante original e instalação das barras. Seleção e conformação da nova madeira a inserir, embutida para fazer a união com a soleira. Os orifícios são perfurados no novo inserto e a resina epóxi é aplicada nas barras. Por fim, é instalada a nova madeira a ser inserida, que deve atender aos requisitos de durabilidade para madeira de uso estrutural, como restrição de nós, fendas, controle de umidade de equilíbrio higroscópico, entre outros.

Esta solução pode ser executada com produtos da empresa italiana "materiais auxiliares para a construção e indústria" (Mapei, em sua sigla em italiano). Consiste em aplicar primeiro na madeira e nos furos para as barras, o produto Mapewood Primer 100, que é um impregnador epoxídico de consistência fluida, deixa-se secar para depois aplicar nas barras e na madeira o produto Mapewood Paste 140, que é um adesivo epóxi de consistência tixotrópica muito eficaz em restaurar elementos estruturais de madeira.

5.2 Reforço usando fibras de carbono

É uma técnica atual de reforço de elementos estruturais, que é usada não só para recuperar estruturas de madeira, mas também concreto e alvenaria. Consiste em fixar ao elemento a ser reforçado, com o uso de resinas epoxídicas, placas de material sintético com fibra de carbono, com uma espessura de 1,2 mm a 1,4 mm e uma largura de 60 mm. O seu desempenho é geralmente dirigido para absorver as forças de tração, neste caso 60,15 kN obtidas como as mais desfavoráveis na modelagem realizada, geradas dada a sua elevada resistência a esta ação. As fibras possuem alta resistência estrutural em comparação com o seu peso praticamente desprezível e são resistentes à corrosão (Morocho, 2014). A desvantagem representada pela aplicação deste método é seu alto custo

5.3 Substituição da soleira por uma de madeira

A soleira é substituída por um dormente com as mesmas dimensões da retirada inicialmente (30x35cm), as uniões nos cantos são feitas a meia madeira e o comprimento da peça se realizará a cada 5 m por uma tala ou pino. A madeira a ser utilizada será a Manilkara valenzuelana (Acana) que é mais dura do que a madeira de cedro.

Projeto da ligação no comprimento.

A ligação no comprimento do elemento baseia-se numa chave de fixação que consiste em transmitir a tensão de tração (N_d) de uma peça a outra através de uma compressão paralela à fibra aplicada à frente com uma superfície $b \times t$ "Figura 31". Passando também o esforço para toda a seção através de um esforço de esforço tangencial no plano de superfície "Figura 31" (Martitegui et al., 2009).

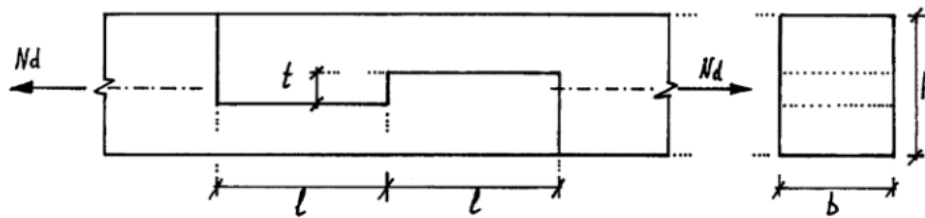


Figura 10. Ligação de chave. Fonte: (Martitegui et al., 2009)

Projeto da ligação de canto.

A ligação nos cantos será feita a meia madeira "Figura 32", reforçada com parafusos rosqueados como pode ser visto na "Figura 33", consistindo de um eixo formado por uma área roscada na ponta (corda) e uma seção lisa (cana)

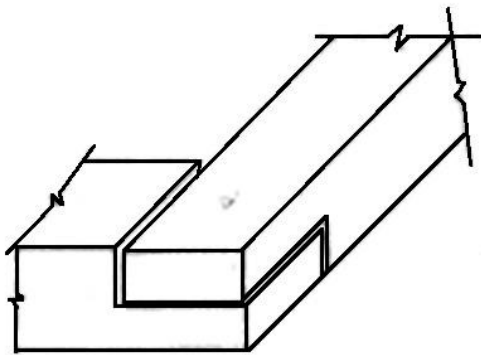


Figura 11. Ligação a meia madeira.
Fonte: (Martitegui et al., 2009).

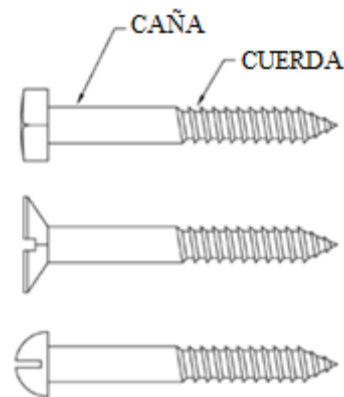


Figura 12. Parafusos com cabeça hexagonal, rebaixada e redonda (de cima para baixo).
Fonte: (Martitegui et al., 2009).

5.3 Substituição de tirantes por tensores de aço

Envolve a colocação de tensores de aço que absorverá a tensão do tirante original, que passarão através da soleira fixando-se por duas porcas e uma placa de metal para evitar o esmagamento da madeira. Usando os esforços axiais obtidos a partir da modelagem dos elementos no programa SAP 2000.

O projeto foi realizado considerando que, quando as barras são utilizadas como membros de tensão, elas podem ser mantidas em posição por meio de roscas com porcas (McCormac, 2002). A tensão

nominal para as hastes roscadas quando a rosca é incluída no plano de corte, de acordo com a Tabela J3.2 do Manual de Carga y Factores de Resistencia de Diseño (LRFD pela sua sigla em Inglês) é igual a $0.75F_u$. A probabilidade de falha destes elementos é levada em conta por fratura devido à redução de área causada pelas roscas.

Foram empregadas no projeto barras de aço A-36 com tensão de escoamento $F_y = 250\text{MPa}$ e tensão última $F_u = 400\text{Mpa}$. Foram analisados para o tensor mais carregado, embora dois tensionadores sejam colocados nas mesmas posições dos tirantes.

É conveniente limitar a $5/8"$ do diâmetro mínimo dos tensores (McCormac, 2002), uma vez que os de menor diâmetro, muitas vezes são danificados durante o processo de construção. Refere-se ainda que alguns projetistas empregam diâmetro não menor de $1/500$ do comprimento dos tensores, a fim de alcançar certa rigidez, mesmo quando os cálculos de tensão permitam diâmetros menores.

6. CONCLUSÕES

Das manifestações patológicas identificadas, as causas mais prováveis estão associadas ao excesso de umidade por vazamentos da cobertura que levaram à proliferação de organismos xilófagos. A lesão que mais afeta o comportamento do conjunto estrutural é a desarticulação ou perda da ligação soleira-tirante, causada pelo apodrecimento destes elementos na área do entalhe, causando o empuxo da parede de fachada e sua conseqüente falha, evidenciada em fissuras verticais na interseção dos eixos e fissuras horizontais na parede do eixo 1 do coro alto. Em geral, a estrutura está em um estado regular.

A solução proposta para resolver a lesão principal foi a substituição da soleira por outra de madeira e os tirantes por tensores de aço, que serão revestidos novamente em madeira para afetar minimamente a estética e beleza da propriedade que constitui um valor patrimonial.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos especialistas do Escritório do Historiador de Havana: a empresa de projetos RESTAURA, o Departamento de Diagnóstico e a Gerência de Investimentos que confiaram em nosso serviço para realizar este trabalho e por toda a colaboração e disponibilidade fornecidas. Agradecemos a colaboração das arquitetas Dayana, Lillian e Linnet.

8. REFERÊNCIAS

Álvarez, L., Basterra, A., Casado-Sanz, M., y Acuña-Rello, L. (2005), “Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera” en I jornadas de investigación en construcción (2-4 de junio de 2005. Madrid, España). Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC. 165-181.





Arduengo García, D. A., Cruz Pérez, A. (2012), *Una nueva lectura del antiguo convento de Santa Clara de Asís desde la arqueología y la historiografía*. Arquitectura y Urbanismo, 33(1), 77-90. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982012000100006&lng=es&tlng=es.

Basterra, L. A., Casado, M., Acuña, L., Ramón-Cueto, G., López, G., Barranco, I., Relea, E. (2005). *Avance de propuestas metodológicas para el diagnóstico y análisis de estructuras de maderas históricas*. In Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz (pp. 27-29).

Carreras, R., Dechamps, R. (1995). *Anatomía de la madera de 157 especies forestales que crecen en Cuba y sus usos tecnológicos, históricos y culturales*. v. 1: El texto, v. 2: Las láminas.

- DCTA-UPM (1998), "*Tratado de rehabilitación: Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*". Tomo 3, Ed. Munilla-Leria.
- Espiniella, D. T. (2001). *Del barroco colonial cubano. Su expresión en la arquitectura religiosa de La Habana*. In Actas III Congreso Internacional del barroco americano: Territorio, Arte, Espacio y Sociedad: Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, 8 al 12 de octubre de 2001 (p. 71).
- Instituto de Ecología y Sistemas de Cuba (1999), *Cuba y sus árboles*. Editorial Academia La Habana. ISBN: 959-02-0252-7
- López, P. A. H. (2006). *El Convento de Santa Clara de La Habana Vieja* (R. y. M. C. Centro Nacional de Conservación Ed.). La Habana Vieja. Cuba: Consejo Nacional de Patrimonio Cultural.
- Martitegui, F. A., González, G. Í., Herrero, M. E., Álvarez, R. A., Cabo, J. L. F. (2009). *Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera*. Documento de aplicación del Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Técnico 03: MADERIA. Sociedad Española de la Madera.
- Matauco, E. N. (2000). *La carpintería de armar española*. (Munilla-Lería Ed.). Ministerio de Cultura, Instituto de Conservación y Restauración de bienes culturales. España.
- McCormac, J. C. (2002). *Diseño de estructuras de acero*. Método LRFD (S. A. d. C.V. Alfaomega Grupo Editor Ed. 2ª edición ed.).
- Morocho, D. E. E. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas*. (Bachelor's thesis), Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador.
- Norma Cubana (2003), *NC 283: 2003 Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño*.
- Norma Cubana (2003), *NC 284: 2003 Edificaciones. Cargas de uso*.
- Norma Cubana (2006), *NC 285: 2006 Carga de viento. Método de cálculo*.
- Norma Cubana (2006), *NC 450: 2006 Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones*.
- Otaño, I. M. G. (2002). *Métodos Organolépticos de Evaluación y Dictámen*. Paper presented at the Conferencia. II: *Evaluación Organoléptica y Diagnóstico en Edificaciones*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Facultad de Arquitectura.
- Pérez, A. C., & Rodríguez, R. (2007). *Plantas epilíticas del Castillo de La Fuerza en el Centro Histórico de La Habana Vieja, mecanismos de dispersión y distribución*. Revista del Jardín Botánico Nacional. Universidad de La Habana, 61-64.
- Pérez, A. C. (2010). *Plantas epilíticas deteriorantes de la Fortaleza San Carlos de la Cabaña*. Revista del Jardín Botánico Nacional. Universidad de La Habana, 219-222.
- Rodríguez, O. A. (2003). *Patología, diagnóstico y rehabilitación de edificaciones*. Monografía. Instituto de Ensayos y Materiales. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. Bolivia.
- Rodríguez, O. Á. (2006). *Metodología para realizar el estudio de diagnóstico para la rehabilitación estructural de forjados planos de madera en edificaciones ubicadas en el Centro Histórico de La Habana*, (Doctorado), CUJAE.
- Roig, J. T. (2014). *Diccionario botánico de nombres vulgares cubanos* (E. Científico Técnica Ed. Cuarta edición ed.). La Habana.
- Santiesteban, F. C. (2007). *Las armaduras de pares en La Habana Vieja. El privilegio de su conservación*. Gabinete de Arqueología, 6, 49-60.
- Tejera Garófalo, P. (2000). *Patología de las Edificaciones en conservación y rehabilitación de edificaciones*. Folleto Maestría.
- Weiss, J. E. (1978). *Techos coloniales cubanos* (E. A. y. Literatura Ed.). La Habana: Editorial Arte y Literatura.

Análise de manifestações patológicas do concreto em viadutos urbanos

H. J. N. Lima¹ *, R. S. Ribeiro² , R. A. Palhares³ , G. S. S. A. Melo¹ 

* Autor de Contato: hjnery@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>

Recepção: 14/06/2018 | Aceitação: 14/11/2018 | Publicação: 30/04/2019

Editor Associado Responsável: Dr. Paulo Helene

RESUMO

O trabalho apresenta o estudo de caso de manifestações patológicas em estruturas de concreto, localizadas no Eixo Rodoviário Norte de Brasília, por meio da metodologia GDE/UnB, que qualifica e quantifica a degradação de danos estruturais. Foi realizada a caracterização do estado geral da estrutura com a finalidade de servir de subsídio para tomadas de decisões quanto a intervenções rotineiras, de forma a ampliar a vida útil da estrutura. A rotina metodológica consiste na realização de inspeções em campo, catálogo das manifestações patológicas estruturais com levantamento fotográfico, caracterização dos fenômenos patológicos e classificação segundo os fatores de ponderação e fatores de intensidade de danos da estrutura conforme a metodologia GDE/UnB para obras de arte especiais, cálculo e classificação global dos danos da estrutura.

Palavras-chave: manifestações patológicas; estrutura de concreto; viadutos.

Citar como: Lima, H. J. N., Ribeiro, R. S., Palhares, R. A., Melo, G. S. S. A. (2019), "Análise de manifestações patológicas do concreto em viadutos urbanos", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 247 – 259, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>

¹ Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

² Departamento de Engenharia Civil, Centro Universitário do Distrito Federal – UDF, Brasília, Brasil

³ Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia – UFJF, Juiz de Fora, Brasil

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Analysis of pathological manifestations of concrete in urban viaducts

ABSTRACT

The paper presents the case study of pathological manifestations in concrete structures, located in the Northern Road Hub of Brasília, using the GDE / UnB methodology, which qualifies and quantifies the degradation of structural damages. The general state of the structure was characterized in order to serve as a subsidy for decision making regarding routine interventions, in order to extend the useful life of the structure. The methodological routine consists of conducting field inspections, catalog of structural pathologies with photographic survey, characterization of pathologies and classification according to the weighting factors and damage intensity factors of the structure according to the GDE / UnB methodology for special works of art, calculation and overall classification of the structure damage.

Keywords: pathologies; concrete structure; viaducts.

Análisis de manifestaciones patológicas del concreto en viaductos urbanos

RESUMEN

El trabajo presenta el estudio de casos de manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón, ubicadas en el Eje Rodoviario Norte de Brasilia, por medio de la metodología GDE / UnB, que califica y cuantifica la degradación de daños estructurales. Se realizó la caracterización del estado general de la estructura con la finalidad de servir de subsidio para tomas de decisiones en cuanto a intervenciones rutinarias, para ampliar la vida útil de la estructura. La rutina metodológica consiste en la realización de inspecciones en campo, catálogo de las manifestaciones patológicas estructurales con levantamiento fotográfico, caracterización de las manifestaciones patológicas y clasificación según los factores de ponderación y factores de intensidad de daños de la estructura conforme a la metodología GDE / UnB para obras de arte especiales, calculo y clasificación global de los daños de la estructura.

Palabras clave: manifestaciones patológicas; estructura de hormigón; viaductos.

1. INTRODUÇÃO

A correta identificação das origens dos problemas patológicos permite ao pesquisador estabelecer em que momento do gerenciamento da obra eles ocorreram, se tiveram origem na fase de projetos; na especificação do material; na etapa de execução da construção pelo uso de uma mão de obra não especializada; por falta de fiscalização; ou ainda se falhas foram decorrentes da operação inapropriada e manutenção deficiente.

Essa análise de identificação e proposição de ataque às manifestações patológicas é apropriada se comparada ao custo de mudanças tardias quando as manifestações já ocorreram, definido no gerenciamento de obras por Mattos (2010) e pelo PMBOK (2014). Neste enfoque ao se avaliar o custo de evitar um problema patológico em diferentes fases de uma obra, observa-se que quanto mais tardio identificarmos a possibilidade de um problema ou manifestações patológicas por falta de planejamento, maior será o custo do reparo e a possibilidade de colapso estrutural.

Segundo Helene (1997), os custos de intervenção crescem exponencialmente quanto mais tarde for essa intervenção e, resumidamente podem ser evitados nas seguintes fases:

- a. Fase de projeto - representa o custo de referência, dentre as medidas que podem ser verificadas para evitar problemas futuros. Pode-se destacar como medidas mitigadoras:
 - Aditivos e adições para melhorar a durabilidade do concreto e diminuir a permeabilidade;

- Aumentar a espessura de cobrimento da armadura como medida de proteção contra a corrosão;
 - Reduzir a relação a/c do concreto de forma a diminuir a porosidade da matriz pasta de concreto e conseqüentemente diminuir a permeabilidade;
 - Aumento da resistência característica do concreto.
- b. Fase de execução – sua intervenção tardia implica num custo 5 (cinco) vezes superior ao custo de uma intervenção tomada como referência a fase de projeto.
- c. Fase de manutenção preventiva - podem custar até 25 vezes mais que medidas corretas tomadas na fase de projeto estrutural. Medidas usuais que poderiam evitar o aumento dos custos:
- Pinturas periódicas
 - Impermeabilizações
- d. Fase de manutenção corretiva - corresponde ao reparo das estruturas que já apresentam manifestações patológicas visíveis. A estas atividades pode-se associar um custo 125 vezes superior ao custo das medidas que poderiam e deveriam ter sido tomadas na fase de projeto. Cabe ressaltar que o alto custo não está apenas associado aos custos de mão-de-obra e dos materiais da manutenção propriamente dita, mas também aos custos indiretos relacionados a sua intervenção, como o tempo e transtornos da interdição da estrutura no período de reparo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Incidências patológicas no concreto

Segundo Metha (2008) e Ribeiro (2014), as causas patológicas do concreto podem ser divididas em três grupos: físicos, químicos e biológicos.

As causas físicas da deterioração do concreto podem ser subdivididas em duas categorias: desgaste superficial (ou perda de massa) por causa da abrasão, da erosão e da cavitação; fissuração em razão de gradientes normais de temperatura e umidade, pressões de cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a extremos de temperaturas, tais como congelamento ou fogo. As causas químicas da deterioração do concreto geralmente são devido a presença de substâncias químicas, podendo ocorrer por: hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta de cimento por água pura; trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento; reações causadoras de produtos expansíveis, tais como expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

As causas biológicas estão relacionadas principalmente com a presença de microrganismos, que propiciam ambiente corrosivos agressivos a pasta de concreto e ao aço, por meio de bactérias oxidantes de enxofre ou de sulfetos, os quais aceleram a deterioração destas estruturas.

2.2 Ensaios não destrutivos

Muitas vezes, além da análise visual, faz-se necessária a realização de ensaios destinados a fornecer informações relacionadas às condições de resistência e ruptura de componentes da estrutura vistoriada, além de maior conhecimento sobre o solo de fundação.

A decisão da realização ou não de ensaios complementares a inspeção visual fica a cargo do engenheiro responsável pela elaboração do laudo técnico. Os ensaios mais conhecidos nas estruturas de concreto e alvenaria são classificados em não destrutivos e ensaios destrutivos conforme Tabela 1.

Tabela 1. Ensaios destrutivos e não destrutivos

Não destrutivos	Destrutivos
Esclerometria; Carbonatação; Controle de fissuras com selos de gesso ou vidros; Ultrassonografia; Gamagrafia; Prova de carga; Medições de deformações e recalques.	Resistência à compressão axial em testemunhos retirados da estrutura; Resistência à tração em testemunhos retirados da estrutura; Módulo de deformação do concreto e de argamassas; Reconstituição do traço de concreto e de argamassa; Massa específica, permeabilidade e absorção de água; Teor de cloretos; Determinação do escoamento à tração em amostras de armadura retiradas da estrutura; Determinação do potencial de corrosão de amostras de armadura retiradas da estrutura; Resistência à compressão de tijolos e blocos individuais; Resistência à compressão de prismas de tijolos e blocos.

3. ESTADO DA ARTE DA METODOLOGIA GDE/UNB

O uso da metodologia GDE/UnB é pertinente para análises de manifestações patológicas uma vez que torna possível a comparação, de forma rápida e objetiva, do grau de deterioração de diferentes estruturas de concreto, por meio de dados coletados em inspeções visuais campo.

Diversos autores desenvolveram a metodologia e a adaptaram no decorrer do tempo para diferentes aplicabilidades.

Klein et.al. (1991) foi o precursor da metodologia aperfeiçoada na Universidade de Brasília. O estudo teve como objetivo criar e implementar um processo de vistorias sistematizadas em estruturas de concreto com o intuito de priorizar ações de reparos de estruturas na cidade de Porto Alegre. A metodologia classifica as estruturas em função da variedade e gravidade dos problemas apresentados, através da definição de um grau de risco. O estudo resultou de convênio firmado entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Prefeitura Municipal de Porto Alegre onde foram classificadas onze obras em função do grau de deterioração dos danos impostos pelas manifestações patológicas.

Castro et al. (1995) desenvolveu uma metodologia sistêmica, adotando por base as observações realizadas por Klein et.al. (1991). A metodologia de Castro, também chamada de metodologia GDE/UnB, tem como objetivo adaptar as avaliações específicas de pontes e viadutos para qualquer estrutura de concreto convencional. No modelo foram implementadas formulações, aperfeiçoadas do modelo de Tuutti (1982) da evolução da corrosão de armadura de concreto. Por analogia, o autor conseguiu quantificar o grau de deterioração em que se encontravam as estruturas para outros processos de degradação. Posteriormente implementou na metodologia o Caderno de Inspeção, que se tratava de um documento essencial de coleta de dados, que continha a conceituação dos danos de maior incidência e referências para os valores de Fatores de intensidade do dano.

Lopes (1998), utilizou a metodologia para desenvolver o estudo de aperfeiçoamento do sistema de manutenção predial de um prédio comercial. Por meio da quantificação da degradação física foi possível prever de maneira confiável o melhor instante para intervenções de manutenção preditiva nas edificações. Neste estudo foi analisado o grau de deterioração da estrutura individual, associando-o aos dos demais componentes, que permitia como resultado num índice de degradação único para a edificação. Entretanto verificou-se a necessidade de realizar algumas alterações na metodologia proposta por Castro et al. (1995), visando melhorar a sua aplicabilidade. Neste estudo

foram feitas as alterações: nas famílias de elementos, na relação de danos, na definição de novos fatores de ponderação de danos e na formulação de cálculo do grau de deterioração de um elemento (G_{de}). A investigação foi realizada em seis edifícios do Banco do Brasil e de forma geral mostrou-se eficiente para uso em aplicações de edificações.

Boldo (2002) relata os resultados de avaliações efetuadas em quarenta edificações de estruturas de concreto do Exército Brasileiro, referente à aplicação da metodologia, que permitiu quantificar o grau de deterioração de estruturas de concreto, mediante parâmetros que avaliam as manifestações de danos e sua evolução. Com a eficiência da metodologia GDE/UnB para o uso em edificações demonstrada, ele possibilitou o estabelecimento de programas de manutenção sistemáticos e mais eficazes em instalações do Exército.

Fonseca (2007) aplicou a metodologia GDE/UnB em estruturas de edificações no Instituto Central de Ciências da UnB – ICC e propôs alterações na formulação para o cálculo do Grau de deterioração de uma família (G_{df}) e do Grau do Dano (D).

Euqueres (2011) fez um estudo com 11 inspeções em estruturas de pontes a fim de validar propostas de reformulação de cálculo de deterioração da estrutura segundo a metodologia GDE/UnB como forma de embasamento nas decisões referentes à reabilitação da obra inspecionada foi realizada inspeções visuais em todas as estruturas. O autor enfatizou a amostragem das incidências das manifestações patológicas pertinentes nas estruturas, dentre as quais pode-se relatar a corrosão das armaduras, fissuras por esmagamento da peça, esmagamento dos aparelhos de apoio, eflorescência com formação de estalactites, falhas de concretagem e manchas de umidade.

Medeiros (2015) avaliou as condições de durabilidade da Ponte sobre o Rio do Carmo em uma região de elevada classe de agressividade ambiental. No estudo foram realizados ensaios não destrutivos de esclerometria, ultrassom, ensaio de profundidade de carbonatação e o ensaio de presença de cloretos. As manifestações patológicas foram avaliadas utilizando as metodologias de inspeções: norma DNIT 010/2004 e a GDE/UnB. Segundo Medeiros pela análise dos resultados, comparativamente a metodologia GDE/UnB resultou em maior acurácia, devido a riqueza de detalhes em sua análise.

Verly (2015) assim como Medeiros (2015) avaliou duas metodologias de inspeção de estruturas quanto a avaliação de obras de arte especiais: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a metodologia GDE/UnB. Verly realizou inspeções visuais em 22 viadutos localizadas em Brasília/DF. Inicialmente foi proposta alterações na formulação da metodologia GDE/UnB para uma melhor aplicação a obras de arte especiais. Pela incidência dos diferentes danos nas estruturas inspecionadas, novamente conclui-se que a metodologia GDE/UnB apresentou resultados com uma melhor escala de valores que facilitavam a priorização das estruturas quanto a tomada de decisão para intervenções.

3.1 Metodologia GDE/Unb

É feita uma série de inspeções no elemento a ser analisado e, após essa fase é realizado um relatório fotográfico das manifestações patológicas apresentadas que são comparadas com o quadro de referência para a atribuição de valores de danos. Com estes dados é possível desenvolver as rotinas da metodologia GDE/UNB.

A Figura 2 apresenta o diagrama de bloco com a sequência de análise do modelo de identificação do grau de deterioração dos elementos e os demais parâmetros utilizados na metodologia.

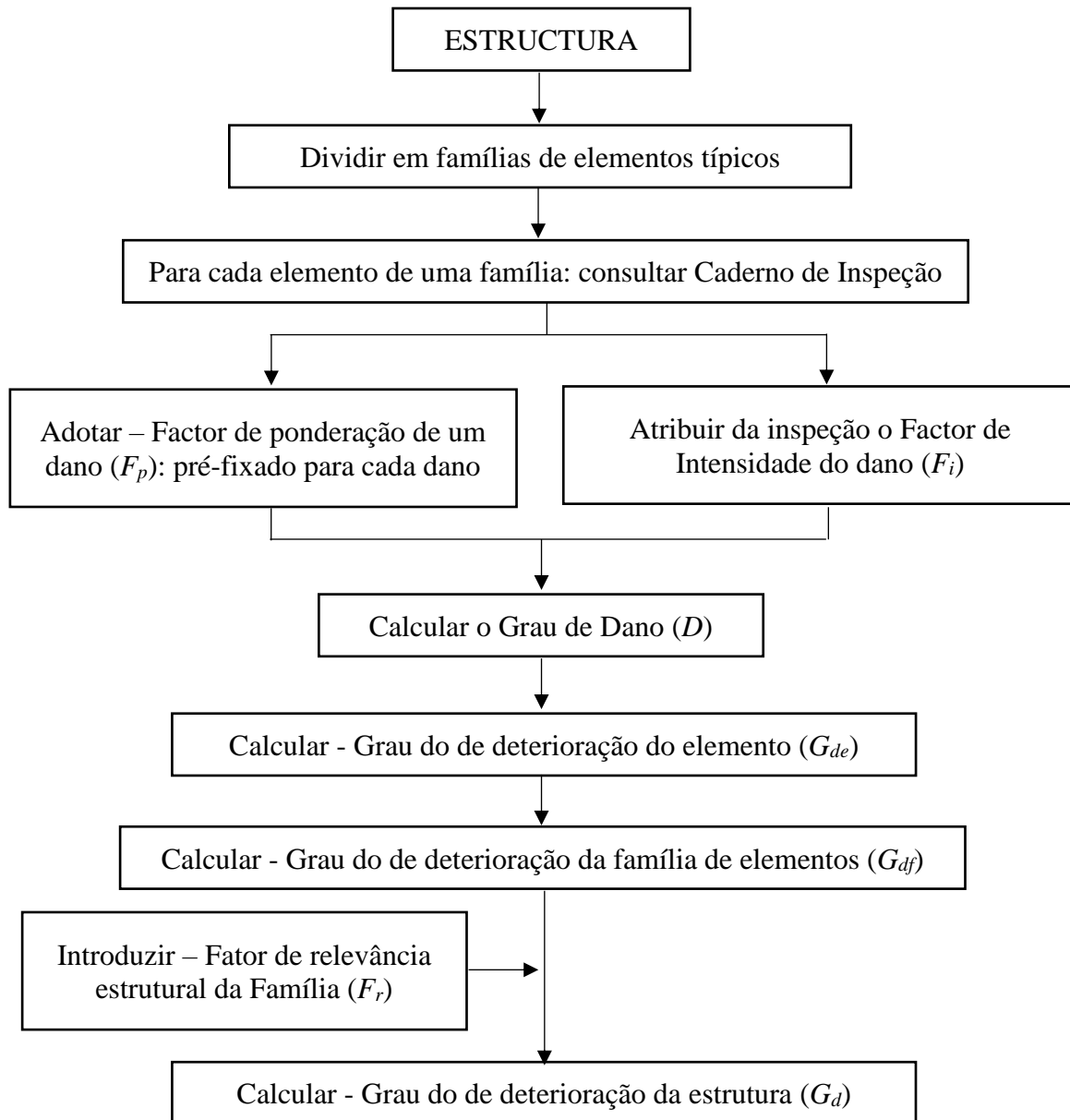


Figura 2. Estrutura da Metodologia GDE/UNB

Inicialmente é realizada a conceituação dos danos e degradações típicas. Com o auxílio das Tabelas de referência são atribuídos os valores dos fatores de ponderação dos danos (F_p) conforme a família de elementos e os fatores de intensidade dos danos (F_i) dos elementos. Depois com o uso das formulações é realizado o cálculo para a determinação dos graus dos danos existentes em cada elemento, das famílias de elementos e do grau de deterioração global da estrutura.

Vale ressaltar que a Norma Brasileira que versa sobre a inspeção das obras de arte é a ABNT NBT 9452 (2016) – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento.

4. ANALISE DOS RESULTADOS

Para a análise da metodologia e dos resultados foram realizadas inspeções em 03 viadutos, todos localizados na Avenida Eixo L, Eixo W e Eixão Norte. Os 03 estão localizados no sentido perpendicular às avenidas, entre as superquadras 103/104 e 203/204 Norte, conforme a Figura 3.



Figura 3. Localização dos 03 viadutos das superquadras 103/104 e 203/204 Norte.

Foram analisados apenas os elementos estruturais dos viadutos que estavam visíveis. Os elementos analisados são compostos por cortinas, laje, guarda-corpo e pista de rolamento. Como o comprimento entre os apoios do viaduto é relativamente curto, nenhuma estrutura apresentou pilares intermediários. A metodologia foi aplicada e utilizada para quantificar os danos estruturais, servindo assim de subsídio para uma tomada de decisão para intervenções.

Como já houveram muitas manutenções de recapeamento do pavimento da estrutura no decorrer dos anos, não foi possível verificar o estado das juntas de dilatação.

A seguir são apresentados os dados coletados de cada estrutura analisada.

4.1 Viaduto 01

O Viaduto 01 fica localizado no Eixo L próximo as superquadras 103/104 Norte.

Foram identificadas manchas nos elementos estruturais de concreto armado em contato com o solo e intemperes, apresentadas na Figura 4. Elas podem causadas principalmente pela infiltração da água da chuva do solo adjacente a estrutura e pela infiltração de água do pavimento flexível da pista de rolamento para a laje. Esta situação poderia ser amenizada se houvesse uma pingadeira na lateral do piso de apoio do guarda corpo que fica sobre a laje e a impermeabilização da camada de concreto sobre a laje antes da camada de CBUQ da pavimentação. Estes fenômenos de impermeabilização deficiente também foram vistos nas Cortinas.

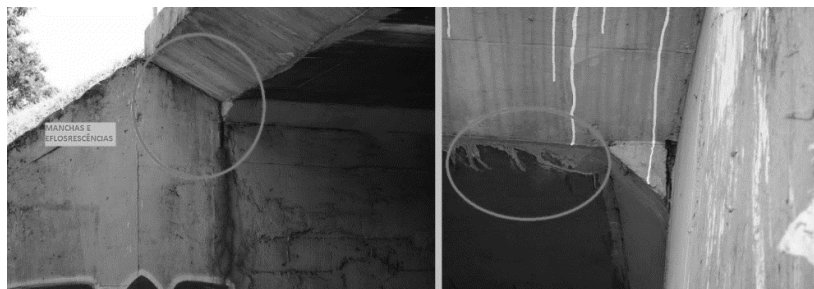


Figura 0. Manchas na estrutura da Laje

Pela análise da Figura 5 foi constatada, na região da Laje, grandes regiões com cobrimento insuficiente de concreto para a proteção da armadura de aço. Como resultado desse cobrimento insuficiente pode-se perceber que a durabilidade da armadura foi afetada de forma significativa, pelo nível de deterioração que o aço apresentou por estar exposto à umidade, observou-se uma redução de seção do aço.



Figura 5. Cobrimento insuficiente e deterioração da Armadura

Foram verificadas falhas na concretagem na superfície da laje assim como segregação do agregado, por lançamento do concreto e vibração. Pôde-se observar também o fenômeno de deterioração do aço principalmente sobre algumas armaduras longitudinais.

Verificou-se outro fator de dano, que apesar de interferir na integridade durabilidade da estrutura, não está incluso na Metodologia GDE/UnB que é o impacto de veículos na estrutura. Neste caso específico observa-se na Laje a grande quantidade de marcas de arrastamento da parte superior de caminhões de carga.

A pista de rolamento, quanto a metodologia, apresentou resultados de manutenção e conservação muito bons, aparentemente, não apresentou desgaste superficial excessivo e nem a presença de trincas e buracos.

4.1.1 Análise do Grau de Deterioração da Estrutura (GD)

A partir da inspeção, foi calculado o Grau de Deterioração da Estrutura. O resultado final da deterioração global da estrutura é definido como sendo a média ponderada dos graus de deterioração das famílias de elementos (G_{df}), tendo como pesos os respectivos fatores de relevância (F_r) da Tabela 2. Sendo considerado o grau de deterioração para a cortina de contenção 7,8, para o guarda-corpo 6,0, para a laje do tabuleiro 34,67.

$$G_d = \left(\frac{\sum_{i=1}^n F_{ri} \cdot G_{df}}{\sum_{i=1}^n F_{ri}} \right) \quad (01)$$

$$G_d = \left[\frac{(7,8 \cdot 3) + (6,0 \cdot 1) + (34,67 \cdot 4)}{3 + 1 + 4} \right] = \frac{168,08}{8} = 21,01 \quad (02)$$

Grau de deterioração da estrutura (G_d) do Viaduto 01 = 21,01

Tabela 2. Fator de Relevância Estrutural das famílias de elementos (F_r)

Família	Fr
Barreiras, guarda-corpo, guarda rodas, pista de rolamento	1
Juntas de dilatação	2
Transversinas, cortinas, alas	3
Lajes, fundações, vigas secundárias, aparelhos de apoio	4
Vigas e pilares principais	5

A estrutura obteve um G_d final de 21,01 que segundo o nível de deterioração é considerado médio para valores da faixa de 15-50, portanto para o Viaduto 01 recomenda-se definir prazo e natureza

de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos. Vale ressaltar que esse prazo para inspeção/intervenção é de acordo com o método de análise adotado, os autores consideram que as intervenções devem ser imediatas e as inspeções serem periódicas.

4.2 Viaduto 02

O viaduto 02 fica localizado sobre o Eixão entre as superquadras 103/104 e 203/204 Norte.

O viaduto apresentou uma grande quantidade de manchas em diversas partes da estrutura, a maioria na parte que fica exposta a chuva sem cobertura. Figura 6.



Figura 6. Manchas espalhadas pela estrutura

Na Figura 7 pode ser observado diferentes tipos de danos na guarda-corpo dentre ele falha na concretagem, deslocamento do cobrimento concreto nos pilares que resultaram na exposição do aço às chuvas e aos agentes corrosivos na armadura.

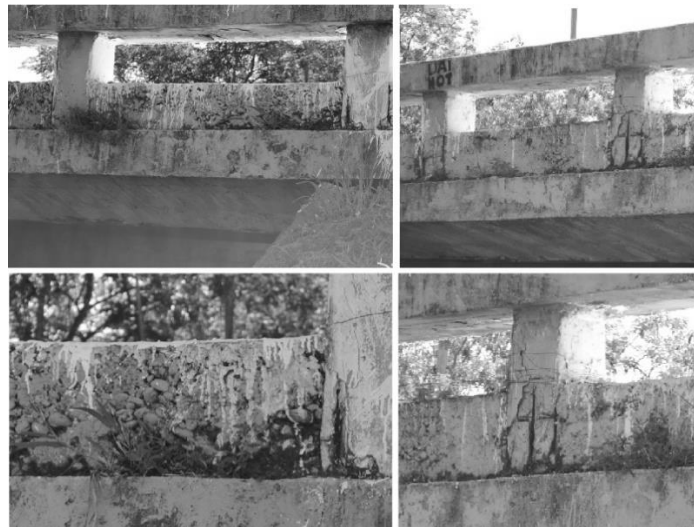


Figura 7. Falha na concretagem, deslocamento do concreto e manifestações patológicas da armadura (Guarda-corpo)

Nas lajes do tabuleiro, também foram observados vários danos como: falha da concretagem por falta de vibração do concreto após o lançamento; manifestações patológicas da armadura e, em alguns lugares, é possível notar um cobrimento deficiente pela visualização de trechos expostos da armadura em pequenas extensões. Na área das bordas da laje, onde fica a parte mais suscetível a ação da chuva, pode-se perceber manchas acentuadas de grande extensão. Também pode-se verificar que este fenômeno tem comprometido a armadura pela deterioração do aço e em algumas partes é possível, visualmente, notar a perda de seção.

Foram observados danos como cobrimento insuficiente, falha na concretagem, manchas e ataque à armadura. E na parte inferior da viga do guarda-corpo foram vistos sinais de falhas de concretagem, trincas, deslocamento do concreto e manifestações patológicas das armaduras nas regiões do aço exposto.

Na Figura 8 é possível visualizar uma trinca vertical e resto de formas de madeira na região da cortina, verifica-se também a condição do pavimento flexível sobre a laje do viaduto, pela figura nota-se um pequeno buraco e uma trinca perpendicular ao fluxo da pista, onde há indícios que tenha sido causada pelo desgaste do material da junta de dilatação do tabuleiro.

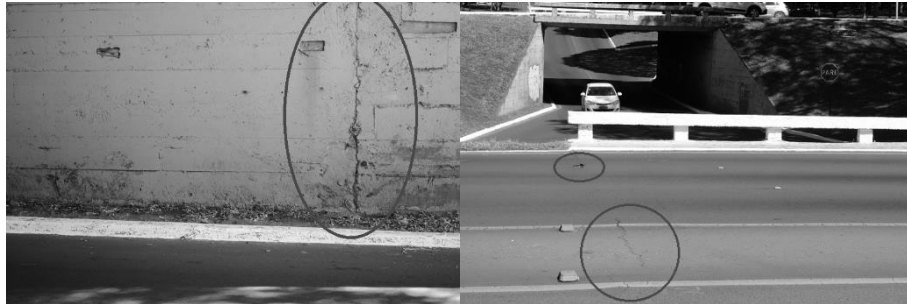


Figura 8. Trinca na Cortina e incidências patológicas na pista de Rolamento

4.2.1 Análise do Grau de Deterioração da Estrutura (GD)

O resultado final da deterioração global da estrutura (Gdf), tendo como pesos os respectivos fatores de relevância (Fr), foi de 37,25, que segundo o nível de deterioração é considerado médio para valores da faixa de 15-50, portanto para o Viaduto 01 recomenda-se definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos. Vale ressaltar que esse prazo para inspeção/intervenção é de acordo com o método de análise adotado, os autores consideram que as intervenções devem ser imediatas e as inspeções devem ser periódicas.

4.3 Viaduto 03

O viaduto 03 fica localizado no Eixo W próximo as superquadras 203/204 Norte.

Na Figura 9 observa-se dois tipos de danos frequentes causado pelo impacto de veículos neste tipo de viadutos, tanto relacionado ao impacto de um veículo no guarda-corpo de proteção quanto ao arrastamento da carroceria de caminhões de carga que trafegam na via com altura superior ao pé direito do viaduto, causando danos ao cobrimento da laje e em algumas ocasiões a própria armadura da estrutura.



Figura 9. Dano na estrutura do guarda-corpo e vista geral - dano na laje por arrastamento de veículos devido altura.

4.3.1 Análise do Grau de Deterioração da Estrutura (GD)

Aplicando a metodologia encontrou-se um G_d final de 19,48 que segundo ao nível de deterioração é considerado médio para valores da faixa de 15-50, portanto para o Viaduto 03 recomenda-se definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos. Vale ressaltar que esse prazo para inspeção/intervenção é de acordo com o método de análise adotado, os autores consideram que as intervenções devem ser imediatas e as inspeções devem ser periódicas.

5. CONCLUSÕES

A partir das informações obtidas na literatura técnica, inspeções de campo e do uso da metodologia GDE/UNB apresentam-se as conclusões a seguir, com a finalidade de servir de subsídio para tomadas de decisões quanto a priorização de intervenções de rotina, para que se amplie a vida útil dos seus elementos e da estrutura de forma global.

- No viaduto 01 o elemento que apresentou um maior grau de deterioração foi a Laje com o valor de 34,67, sendo recomendado para a mesma definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos devido ao seu grau de dano Médio.
- No viaduto 01, o G_d apresentou um valor final de 21,01 que segundo ao nível de deterioração é considerado médio, portanto recomenda-se definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos.
- No viaduto 02 o elemento que apresentou um maior grau de deterioração foi a Laje com o valor de 62,46 considerado alto, sendo recomendado definir prazo para inspeção especializada e planejar uma intervenção em médio prazo em um período de no máximo 1 ano.
- No viaduto 02, o G_d apresentou um valor final de 37,25 que segundo ao nível de deterioração é considerado médio, portanto recomenda-se definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos.
- No viaduto 03 o elemento que apresentou um maior grau de deterioração foi a Guarda-corpo com o valor de 84,53 considerado um nível sofrível, recomenda-se definir prazo para inspeção especializada rigorosa e planejar uma intervenção a curto prazo de no máximo 6 meses.
- No viaduto 03, o G_d apresentou um valor final de 19,48 que segundo ao nível de deterioração é considerado médio, portanto recomenda-se definir prazo e natureza de uma nova inspeção e planejar uma intervenção a longo prazo de no máximo 2 anos.
- Sendo assim o Viaduto 02 foi o que apresentou o maior valor de deterioração de 37,25, uma vez que os viadutos são bem próximos, uma justificativa plausível para esta diferença de valores seria o fluxo de veículo que neste viaduto é bem mais intenso que os outros dois, causando a sua diminuição de durabilidade e vida útil da estrutura.
- Os elementos que também sofreram a maior incidência de danos foram as lajes que podem ser comprovados tanto visualmente pelos registros fotográficos de campo quanto pelos resultados da metodologia.

Diante do exposto, considera-se que a metodologia atende a suas premissas de auxiliar o engenheiro responsável à tomada de decisão de forma rápida sobre inspeções de viadutos e outras obras de arte especiais. Sugere-se que inspeções sejam feitas periodicamente e que a manutenção também seja periódica a fim de garantir a segurança e durabilidade estrutural dos elementos analisados.

O reparo e reforço dos elementos que necessitem de intervenção devem ser provenientes de projetos elaborados por profissionais especializados e executados por empresas com capacidade

técnica para atuação em recuperação e reforço de estrutura de pontes. Um ponto que deve ser levado em consideração é que devesse ser implementado um sistema de gestão para que sejam geridas as obras, inspeções, monitoramento e intervenções. O tráfego aumenta constantemente, o que evidencia a necessidade de controle do sistema viário.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, à CAPES e à FAP-DF pelo apoio financeiro em todas as etapas desta pesquisa. Agradecem também ao Centro Universitário do Distrito Federal – UDF pelo apoio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016), *ABNT NBR 9452:2016 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Boldo, P. (2002), *Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 295p.
- Castro, E. K. (1994), *Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 185 p.
- Castro, E. K., Clímaco, J. C. T. S., Nepomuceno, A. A. (1995), “*Desenvolvimento de uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto armado*”, 37º. Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto - Ibracon, Anais, v.1, pp. 293-307, Goiânia.
- Euqeres, P. (2011), *Metodologia de inspeção em estruturas de pontes de concreto armado*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 168 p.
- Fonseca, R. P. (2007), *A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 213 p.
- Helene, P. R. L. (1997), *Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São Leopoldo. Anais, São Leopoldo: ANTAC, 1997. p. 31-42.
- Klein, D. L., Gastal, F. P. S. L., Campagnolo, J. L. (1998), *Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte*. In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 1991, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 1991, p. 185-197
- Lopes, B. A. R. (1998), “*Sistema de manutenção predial para grades estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 308 p.
- Mattos, Aldo Dórea (2010), *Planejamento e controle de obras*. Pini.
- Medeiros, A. G. (2015), *Análise de durabilidade da ponte do Rio do Carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UNB*. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. URI: <http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20496>
- Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. (2008), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3º ed., IBRACON, São Paulo, p. 674.
- Ribeiro, D. V. et al. (2014), *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e*

métodos de análise. 1º ed., Campus / Elsevier, Rio de Janeiro, 2014. p. 272. ISBN:978-85-352-7547-6

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm - Swedish Cement and Concrete Research Institute.

Verly, R. C. (2015), *Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)—Universidade de Brasília, Brasília.