

ALCONPAT Internacional

Membros 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

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Diretor General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vice-presidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vice-presidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesoureiro

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

Enrique Cervera Aguilar, **México**
Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor em Chefe:

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 em Chefe (2022-2023):

Dra. Edna Possan
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Curitiba, **Brasil**

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernández Cánovas
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**.

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 Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini

Universidad de Perugia,

Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,

Chennai, **India**

**REVISTA LATINO-AMERICANA 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 terceiro número do nosso décimo segundo ano.

A Revista ALCONPAT (RA) tem como objetivo a publicação de produção citável (pesquisa básica ou aplicada, e resenhas), pesquisa documental e estudos de caso, relacionados aos temas de nossa associação, ou seja, controle de qualidade, patologia e recuperação do construções.

Esta edição V12 N3 começa com um artigo do **Brasil**, onde Joaquín Humberto Aquino Rocha e colegas realizam uma revisão sistemática da literatura dos últimos cinco anos sobre o uso de nanofibras de celulose (NFC) em compósitos à base de cimento. São apresentadas as principais formas de produção e dispersão, com destaque para o efeito no comportamento dos materiais cimentícios. O estudo considerou a influência do NFC nas propriedades no estado fresco e endurecido: reologia, hidratação, resistência à compressão, resistência à flexão, energia de fratura, entre outras. Os NFCs têm efeitos benéficos nas propriedades mecânicas; no entanto, ainda são necessárias mais pesquisas para otimizar a produção de NFC e os processos de pré-tratamento; estabelecer relações sobre a durabilidade de compostos com NFC e identificar os possíveis impactos ambientais de seu uso.

No segundo artigo, do **Brasil**, Marcus Luiz Alves dos Santos Costa e colegas apresentam e discutem o uso de resíduos sólidos industriais em função de como melhorar as propriedades mecânicas de compósitos de cimento. Para isso, avaliou-se a incorporação de pó de granito “triturado” e pó de mármore na fabricação de compósitos à base de cimento, substituindo parcialmente o agregado miúdo natural em teores de 50% e 100%. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, além da avaliação da resistência à compressão axial dos corpos de prova. Os resultados mostraram que as misturas contendo 50% de agregado reciclado conferem ao material uma resistência à compressão de 29,09 MPa, ou seja, 4% superior às misturas de referência, sendo os resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade de agregados reciclados em peças de concreto.

O terceiro trabalho desta edição é do **México**, onde Josefa de los Angeles Paat Estrella e um colega avaliam a realcalinização eletroquímica em diferentes tempos e intensidades de corrente de acordo com o disposto nas normas UNE-EN-1504, NACE-SP0107 e NMX-C-553-ONNCCE em estruturas de concreto armado previamente carbonatadas, determinando o grau de realcalinização, pH e potencial de meia célula a cada 7 dias durante 28 dias. Conseguiu-se uma recuperação do pH em relação ao tempo e intensidade de corrente,

obtendo valores de Ecorr abaixo de -350 mV, que de acordo com a norma ASTM C876-15, correspondem a 90% de probabilidade de corrosão. Porém, foi o NMX-C-553-ONNCCE-2018 que apresentou potencial sem atingir a região de superproteção, sem risco de produzir hidrogênio e fragilidade no aço.

No quarto artigo do **Brasil**, Camila G. Luz Nunes e colegas tiveram como objetivo otimizar a produção de mistura asfáltica a quente usando asfalto-borracha. Para isso, foi avaliado o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com diferentes ligantes: asfalto borracha comercial (AC08), asfalto borracha 10% (AC10) e 15% (AC15) de resíduo de borracha e asfalto convencional (PEN 50-70). Para a composição dessas misturas, o teor ótimo de asfalto foi definido pelo método Marshall. Para a realização dos ensaios mecânicos, foram testados corpos de prova moldados com compactadores Marshall e Superpave. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que as misturas com AR08 e AR10, compactadas com Superpave, apresentaram o melhor desempenho mecânico. No entanto, já existe no mercado o ligante AR08, o que facilita a sua utilização em trabalhos de pavimentação.

O quinto artigo, de José Luis Pérez-Díaz e colegas, vem do **México** e avaliou o risco de corrosão do aço no concreto, usando sensores galvânicos internos de aço carbono/aço inoxidável com eletrodo externo de Cu/CuSO₄. Os sensores foram utilizados para monitorar os potenciais e correntes de macrocélulas de corpos de prova prismáticos de concreto armado, com relações água-cimento de 0,4 e 0,6, imersos em solução de NaCl 5%, por 18 meses. Os resultados dos potenciais mostraram uma boa correlação entre os dois eletrodos de referência, podendo avaliar a corrosão do sistema. Além disso, a técnica do ruído eletroquímico suporta o efeito dos íons cloreto. Portanto, sensores galvânicos podem ser considerados para implementação no monitoramento e avaliação do estado de risco de corrosão em estruturas de concreto armado.

A sexta obra desta edição é escrita por Danilo Pereira dos Santos e Maiara Feliciano dos Santos do **Brasil**. Este trabalho analisa o impacto da corrosão na estabilidade global de pilares de concreto armado, avaliando a eficácia dos critérios de redução de rigidez propostos pela ABNT NBR 6118:2014. Com a análise, utilizando modelos de elementos finitos que reproduzem o comportamento dos materiais, definiu-se que a corrosão causa a intensificação de tensões globais de segunda ordem na estrutura. No entanto, em situações críticas, a perda de equilíbrio na seção transversal resultou em falha estrutural antes mesmo da perda de estabilidade. O estudo foi realizado tanto através de uma análise geométrica não linear quanto através da aplicação do coeficiente γ_z , onde se concluiu que a posterior adição de efeitos reológicos pode levar a uma configuração que extrapola os limites propostos pela norma brasileira.

No sétimo trabalho, do **México**, Joel A. Moreno Herrera e colegas avaliaram a mudança no comportamento à flexão de vigas de concreto armado. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a alto índice de corrosão. Os parâmetros eletroquímicos considerados

foram a taxa de corrosão, resistividade elétrica e concentração de cloreto. As vigas foram testadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. Padrões de fissuração, escoamento e cargas de pico, rigidez de escoamento e ductilidade de deslocamento das vigas são apresentados. Com base na análise desses parâmetros estruturais, conclui-se que o comportamento à flexão das vigas com e sem corrosão foi semelhante.

O artigo que fecha a edição é do **Brasil** G. H. Teixeira e colegas, que mostram a aplicação das metodologias GDE (Grau de Deterioração da Estrutura) e GUT (Gravidade, Urgência e Tendência), quantificando as manifestações patológicas e determinando os pontos de maior necessidade de manutenção. Assim, foi aplicada uma perspectiva quantitativa com a aplicação das referidas metodologias e após as inspeções ao edifício e uma análise visual com registo fotográfico, anotações e cartografias, foram aplicadas as metodologias e obteve-se que a maioria das manifestações patológicas que ocorrem no A estrutura do edifício tem origem na humidade, originando eflorescências, manchas ou infiltrações. Desta forma, este trabalho definiu os pontos que precisam ser priorizados, orientando as providências que podem ser tomadas posteriormente. As metodologias se mostraram eficazes e importantes para a tomada de decisão.

É importante mencionar que os ONCyTS do Brasil e do México têm mantido a Revista Alconpat em seus índices de Qualidade de Revistas Científicas. Em particular, no México, a Revista Alconpat consolidou-se internacionalmente e o Sistema Nacional de Pesquisadores já a considera um produto válido para a promoção e permanência de seus membros. Esta foi uma grande conquista, produto do esforço de todos, autores, revisores e comitê editorial. Da mesma forma, é importante mencionar que a Revista Alconpat já pertence ao Directory of Open Access Journals (DOAJ), o que é um passo definitivo para se candidatar a novos índices. A Alconpat também está fazendo um investimento econômico significativo para que todos os seus números sejam marcados em XML-Jats para que possam ser avaliados em índices de maior prestígio. Parabéns e nosso muito obrigado a todos.

Temos certeza de que os artigos deste número constituirão uma importante referência para os leitores envolvidos com questões de avaliação e caracterização de materiais, elementos e estruturas. Agradecemos aos autores participantes desta edição pela disposição e esforço em submeter artigos de qualidade e dentro dos prazos estabelecidos.

Pelo Conselho Editorial



Pedro Castro Borges
Editor Chefe

CONTENIDO

REVISÃO

Rocha, J. H. A., Farias, L. do N., Siqueira, T. P. L.: Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura.

Página

311 - 327

PESQUISA BÁSICA

Costa, M. L. A. S., Valões, D. C. P., Nascimento, C. F. G., Silva, G. R., Lima, E. G. S., Silva, T. T. S., Santos, T. S.: Análise das características do concreto com a substituição do agregado miúdo natural por resíduos sólidos industriais.

328 – 346

Paat, J. A., Miam, J. A., Maldonado, E. E., Nieves, D., Pérez, T.: Realcalinização eletroquímica de corpos de prova de concreto carbonatado aplicado sob os critérios de três normas .

347 – 361

Nunes, C. G. L., Pereira, P. H. S., Melo, R. A., Rodrigues, J. F. K. G., Lucena, L. C. F. L.: Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente.

362 – 377

Pérez, J. L., Cabrera, J. A., Hernández, D., Godínez, E. A., Mundo, M. D.: Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto.

378 – 397

Santos, M. F., Santos, D. P.: Avaliação da influência da corrosão na estabilidade global de colunas em concreto armado.

398 – 416

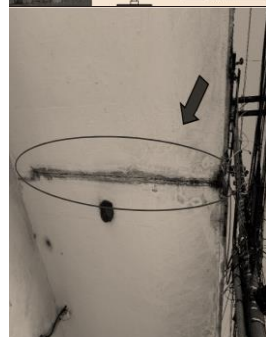
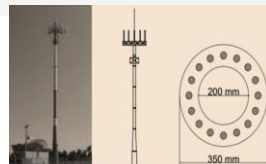
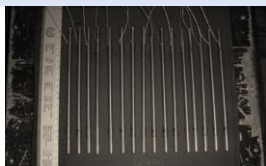
Moreno Herrera, J. A., Varela Rivera, J. L., Visairo Méndez, R., Castro Borges, P.: Comportamento a flexão de vigas de concreto armado com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão.

417 – 427




PESQUISA APLICADA

Teixeira, G. H., Silva, J. R. Alves, E. C.: Avaliação das manifestações patológicas do Edifício Rio Negro em Anápolis-Goiás.

428 – 443



Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura

J. H. A. Rocha^{1*} , L. do N. Farias¹ , T. P. L. Siqueira¹ 

* Autor de Contato: joaquin.rocha@coc.ufrj.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.594>

Recepção: 13/03/2022 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura dos últimos cinco anos sobre o uso de nanofibras de celulose (NFC) em compósitos cimentícios. São apresentadas as principais formas de produção e dispersão, com destaque para o efeito sobre o comportamento dos materiais à base de cimento. O estudo considerou a influência das NFC nas propriedades no estado fresco e endurecido: reologia, hidratação, resistência à compressão, resistência à flexão, energia de fratura, entre outras. As NFC têm efeitos benéficos nas propriedades mecânicas; no entanto, maior pesquisa ainda é necessária para otimizar a produção e os processos de pré-tratamento das NFC; estabelecer relações sobre a durabilidade dos compósitos com NFC, e identificar possíveis impactos ambientais da sua utilização.

Palavras-chave: nanomateriais de celulose; compósitos cimentícios; estado fresco; estado endurecido; propriedades mecânicas.

Citar como: Rocha, J. H. A., Farias, L. do N., Siqueira, T. P. L. (2022), “*Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura*”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 311-327., DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.594>

¹ Programa de Engenharia Civil, PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J. H. A. Rocha, contribuiu com a ideia original em um 33%, coleta de dados em um 40%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 40%, redação e discussão dos resultados em um 40%; a autora L. do N. Farias contribuiu com ideia original em um 33%, coleta de dados em um 30%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 30%, redação e discussão dos resultados em um 30%, e a autora T. P. L. Siqueira contribuiu com ideia original em um 34%, coleta de dados em um 30%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 30%, redação e discussão dos resultados em um 30%.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Cellulose nanofibers (CNF) as reinforcement for cementitious matrices: a systematic literature review

ABSTRACT

The aim of this study is to conduct a systematic literature review of the last five years on the use of cellulose nanofibers (CNF) in cementitious composites. The main production and dispersion methods are presented with emphasis on their effect on the behavior of cement-based materials. The study considered the influence of CNF on the fresh and hardened state properties: rheology, hydration, compressive strength, flexural strength, fracture energy, among others. CNF show positive effects on mechanical properties. However, further research is still necessary to optimize the production and pretreatment processes of CNF, establishing relationships regarding the durability of composites with CNF, and identifying possible environmental impacts of their use.

Keywords: cellulose nanomaterials; cementitious composites; fresh state; hardened state; mechanical properties.

Nanofibras de celulosa (NFC) como refuerzo para matrices cementicias: revisión sistemática de la literatura

RESUMEN

El objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura de los últimos cinco años sobre el uso de nanofibras de celulosa (NFC) en compuestos a base de cemento. Se presentan las principales formas de producción y dispersión, con énfasis en el efecto sobre el comportamiento de los materiales a base de cemento. El estudio consideró la influencia de las NFC en las propiedades en estado fresco y endurecido: reología, hidratación, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, energía de fractura, entre otras. Las NFC tienen efectos beneficiosos sobre las propiedades mecánicas; sin embargo, aún se necesita más investigación para optimizar la producción de NFC y los procesos de pretratamiento; establecer relaciones sobre la durabilidad de los compuestos con NFC, e identificar los posibles impactos ambientales de su uso.

Palabras clave: nanomateriales de celulosa; compuestos de cemento; estado fresco; estado endurecido; propiedades mecánicas.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais de construção mais sustentáveis e com reduzida emissão de CO₂ vêm crescendo significativamente ao longo das últimas décadas devido, principalmente, ao aquecimento global e ao fato de a indústria da construção ser considerada uma das mais poluentes do mundo (UN Environment *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2020). Nesta busca por materiais com menor impacto ambiental encontra-se a utilização dos chamados biomateriais, ou seja, materiais que incorporam em sua formulação produtos de origem vegetal (Barnat-Hunek *et al.*, 2019; Nishimura *et al.*, 2019; Abdellaoui; Bouhfid, 2020; Barría *et al.*, 2021). Segundo Hoyos *et al.* (2019) a sustentabilidade de um material é definida pela sua capacidade e taxa de regeneração e pela possibilidade de ser reassimilado ao meio ambiente após o uso.

Além disso, a utilização de materiais de escala nanométrica, chamados nanomateriais, em materiais de construção também vêm ganhando força ao longo dos últimos anos. Através da nanomodificação é possível alterar a nano e microestrutura das matrizes cimentícias visando modificar diversas propriedades do material (Santos *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021). Estas alterações afetam o comportamento macro das matrizes, podendo aumentar a resistência, a deformabilidade e a condutividade térmica dos materiais. Assim sendo, as nanofibras de celulose (NFC) se apresentam como um material promissor a ser incorporado nos materiais de construção (Hisseine *et al.*, 2019; Claramunt *et al.*, 2019).

As NFC são uma categoria de biopolímero que pode ser sintetizada por plantas, bactérias e algas (Hoyos *et al.*, 2019; Ogura *et al.*, 2020) e que apresenta elevada resistência, rigidez e módulo de elasticidade, podendo melhorar diversas características das matrizes cimentícias tradicionais (Mejdoub *et al.*, 2016; Dongre; Suryawanshi, 2021). Além disso, as NFC apresentam como uma das principais vantagens ambientais uma elevada biodegradabilidade, baixa toxicidade e riscos ambientais e à saúde mínimos (Hisseine *et al.*, 2019).

Estudos mostram que a incorporação de nanofibras de celulose pode aumentar a viscosidade das matrizes, atuando de maneira similar à um aditivo modificador de viscosidade, e apresentam a capacidade de reter água o que, conseqüentemente, reduz a exsudação das misturas (Hisseine *et al.*, 2018a; Bakkari *et al.*, 2019). Analisando o desempenho mecânico das matrizes com incorporação de NFC, percebe-se uma tendência a um ganho de resistência à compressão e à flexão das matrizes quando comparadas às misturas de referência (Cengiz *et al.*, 2017; Kolour *et al.*, 2020). Porém, quando a adição se dá em teores muito elevados os efeitos podem ser negativos devido ao aumento da porosidade das misturas (Sun *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2018; Alzoubi *et al.*, 2020).

Com isso, o presente estudo apresenta como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) visando levantar dados existentes acerca da utilização de nanofibras de celulose (NFC) em matrizes cimentícias e identificar lacunas de conhecimento ainda não exploradas. Para isso foi realizado tanto um levantamento dos trabalhos mais recentes publicados sobre o tema como uma análise dos dados encontrados de maneira que este trabalho sirva de base para estudos futuros.

2. METODOLOGIA

Para realizar este estudo foram definidas algumas perguntas que serviram de base para escolha e análise dos estudos encontrados. As perguntas formuladas foram:

1. - Quais as dimensões das fibras mais utilizadas atualmente e o percentual de incorporação mais empregadas na literatura?
2. - Quais são os métodos de tratamento/dispersão mais empregados nas NFC observados nos estudos?
3. - Quais as propriedades mais analisadas dos compósitos reforçados com NFC e,

consequentemente, quais os ensaios mais realizados?

Além destas perguntas foi realizado um mapeamento dos estudos encontrados analisando os países, instituições e autores que mais publicaram acerca do tema e as palavras-chave mais empregadas. Para responder a essas perguntas foram escolhidas duas bases de dados para levantamento dos artigos: *ScienceDirect* e *Google Scholar*. A primeira base de dados engloba diversas revistas indexadas em *Scopus* e *Web of Science*. Além disso, através do método conhecido como *snowball*, foram adicionados artigos relevantes e com alto índice de citação presentes no *Google Scholar* que não estivessem presentes na primeira base de dados e que foram publicados em revistas com fator de impacto (*Scopus* e *Web of Science*).

Este estudo analisou todos os artigos de pesquisa relacionados ao tema publicados entre os anos de 2016 e 2021 e escritos em inglês. A *string* de pesquisa utilizada para realizar o levantamento dos estudos foi: "CELLULOSE NANOFIBERS" AND ("CEMENT MATRICES" OR "MORTAR" OR "CONCRETE") resultando em um total de 163 artigos para análise.

Após a exclusão dos capítulos de livro e artigos de revisão de literatura e adição dos artigos relevantes através do método *snowball* foram analisados os títulos e resumos dos artigos. Aqueles que não respondiam às perguntas propostas ou que não incorporaram as fibras em matrizes cimentícias foram excluídos. Por fim, todos os 29 artigos considerados relevantes foram analisados em sua integridade.

O programa *VOSViewer* (versão 1.6.17) foi utilizado para uma análise bibliométrica complementar dos artigos selecionados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Mapeamento dos estudos

No mapa da Figura 1, percebe-se que os países que mais publicaram acerca do tema foram os Estados Unidos, com 10 artigos publicados, Canadá, com 7 artigos, China com 4 artigos e Espanha e Brasil com 3 artigos cada. Todos os outros países que aparecem representados com tom mais claro de verde contribuíram com uma publicação cada. Com estes resultados pode-se perceber uma predominância dos países do hemisfério norte em publicar sobre o tema estando presentes em 43% das publicações. Apesar disso, consegue-se perceber que este é um assunto que está sendo estudado ao redor de todo o mundo, com participação de 16 países distintos nos artigos encontrados.

Os autores que mais publicaram sobre o tema estão apresentados na Figura 2, onde as cores claras (amarelo) indicam um maior número de trabalhos publicados, diferenciados por grupos de autores. Notou-se que alguns autores se envolveram em mais de uma publicação sobre o tema. Enquanto 70% dos estudos apresentaram diferentes autores. Esta análise mostra que existe um elevado interesse sobre a incorporação de NFC em matrizes cimentícias uma vez que diversas instituições e diversos autores se encontram envolvidos nestas pesquisas.

A Figura 3 apresenta as palavras mais utilizadas nos títulos e nas palavras-chave dos artigos estudados. De acordo com os dados levantados percebe-se uma predominância das palavras "cellulose nanofibers". Além disso, percebe-se a presença das propriedades que os artigos analisaram, entre elas, "mechanical properties" e "compressive strength". Através dos resultados encontrados percebe-se que existem uma grande variedade de abordagens sendo empregadas atualmente quanto da utilização de NFC, indicando a gama de variedade vantagens que esse material pode apresentar quando incorporado em diversos tipos de matrizes.

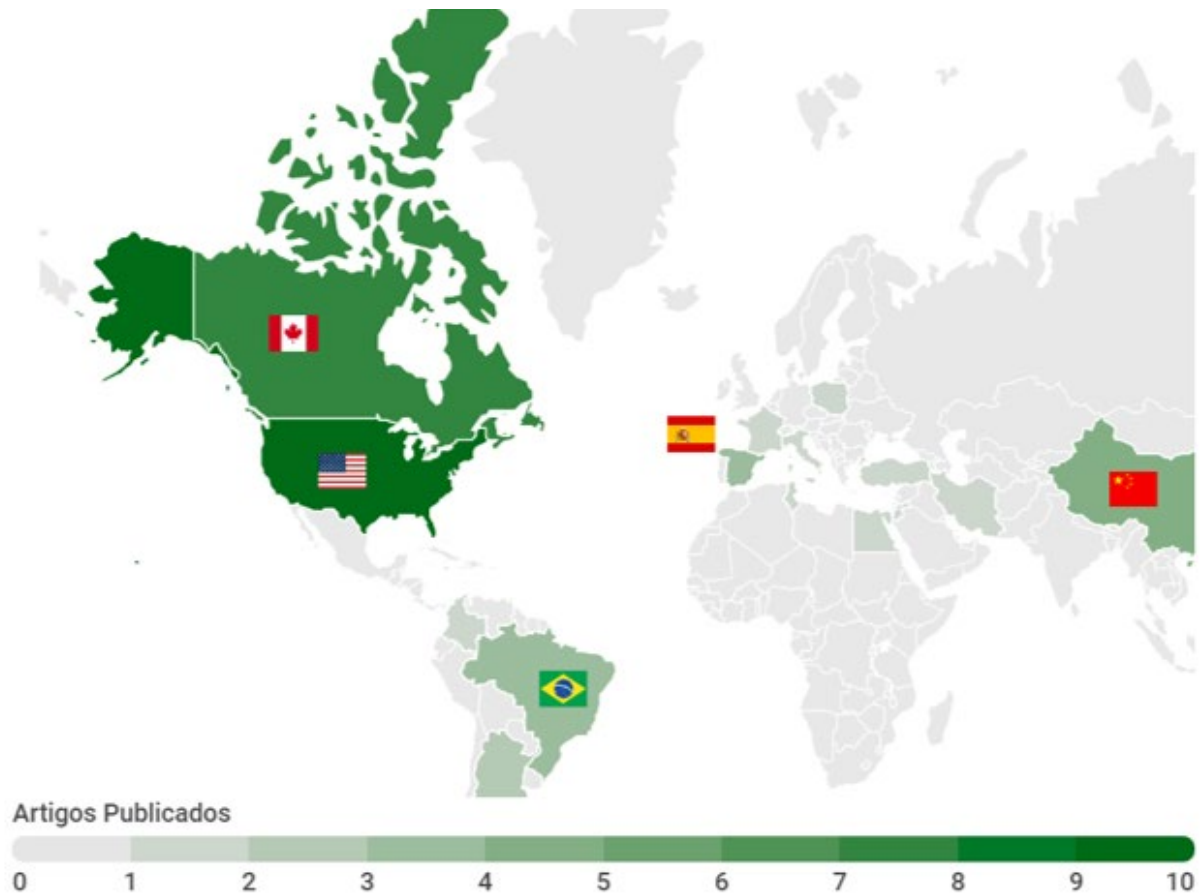


Figura 1. Países que mais publicaram acerca do tema.

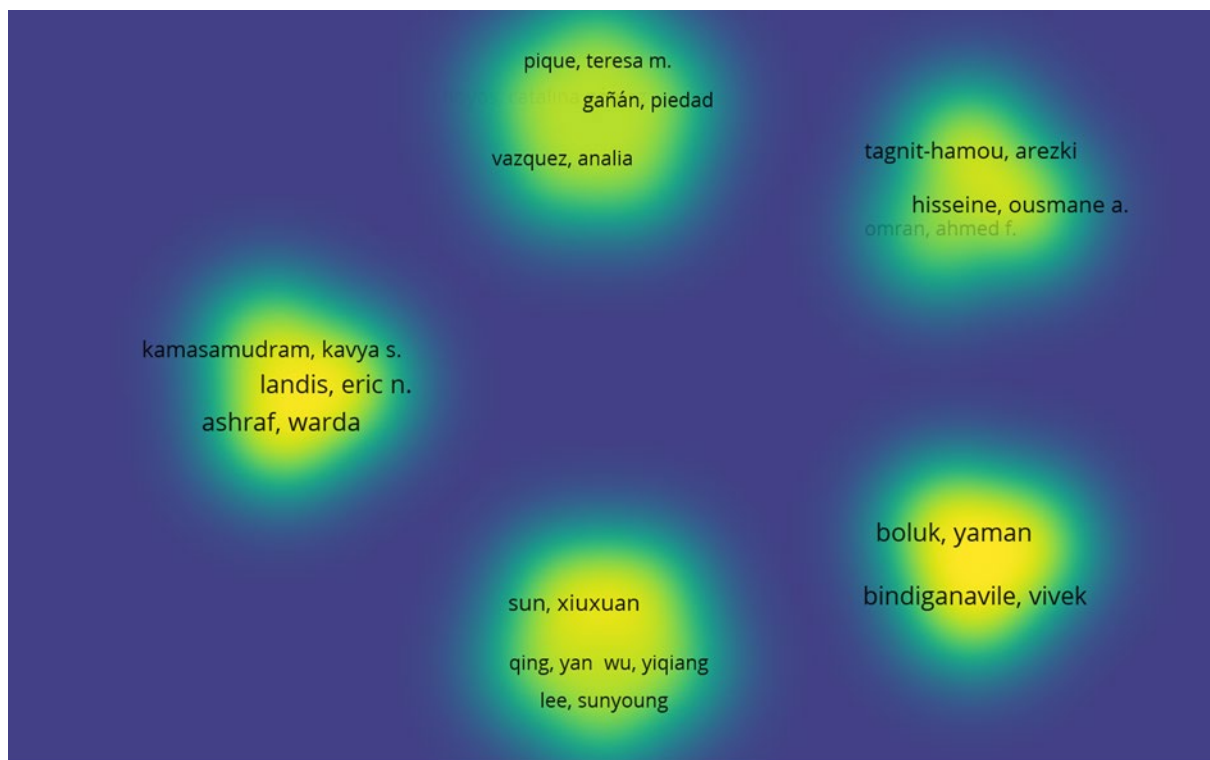


Figura 2. Mapa de densidade dos autores que mais publicaram acerca do tema.

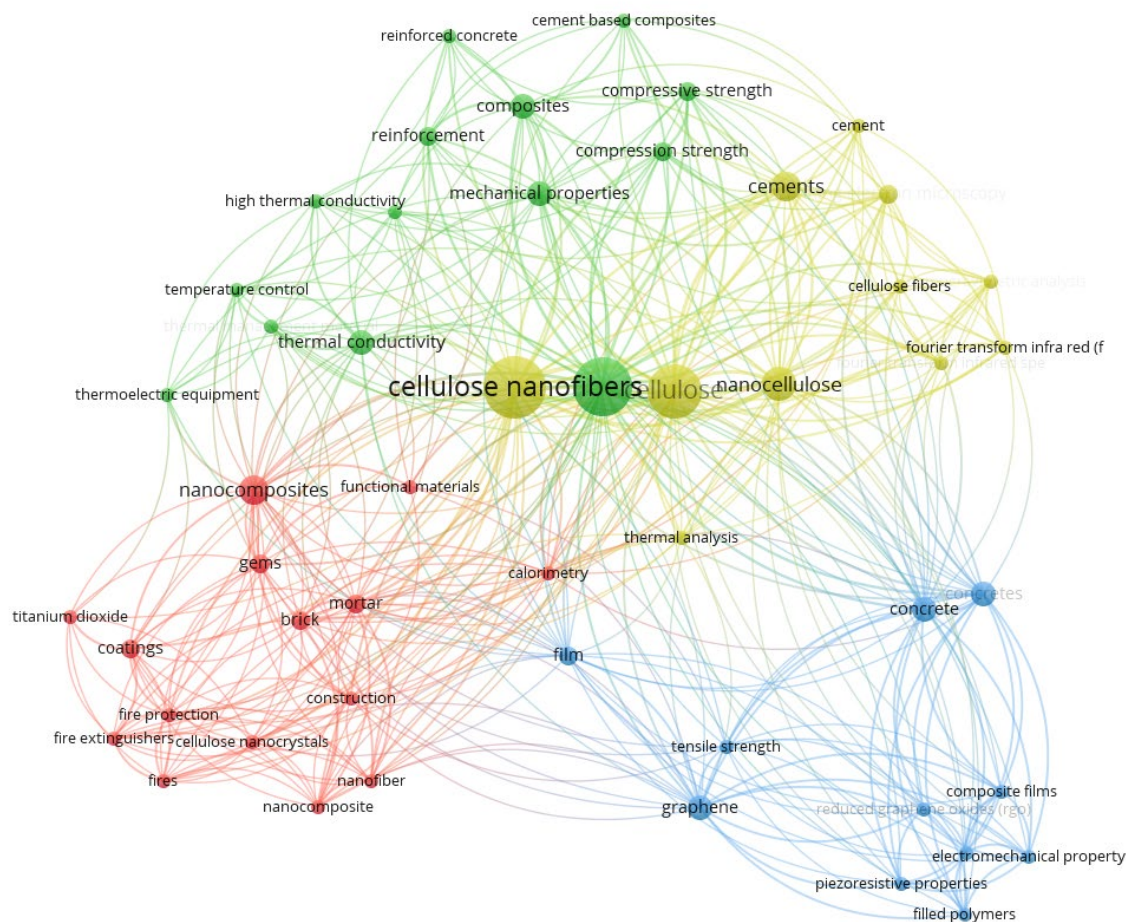


Figura 3. Principais palavras nos títulos e palavras-chave dos artigos.

3.2 Nanofibras de celulose (NFC)

A celulose passa por diversos tratamentos químicos ou físicos até dar origem a nanocelulose. Por sua vez, conforme o método de extração utilizado, a nanocelulose também pode ser dividida em alguns grupos, como nanofibras de celulose (NFC) e nanocristais de celulose (NCC). Os NCC são comumente conhecidos como celulose nanocristalina, *nanowhiskers*, nanocristais e os monocristais, enquanto os NFC são muito mais finos pois são extraídos das microfibras de celulose presentes na biomassa, são geralmente citados como microfibrilas de celulose, nanofibrilas ou nanofibrilada de celulose e consistem basicamente em nanopartículas/nanofibrilas flexíveis longas com domínios cristalinos e amorfos alternados (Abdul Khalil *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2020; Dhali *et al.*, 2021).

As NFC têm dimensões entre 5-50 nm de largura e 1–5 µm de comprimento, possuem entre 50–70% de cristalinidade e uma área de superfície extremamente alta (Goncalves *et al.*, 2021). As NFC possuem uma natureza hidrofílica, por isso, um baixo teor, entre 0,1% e 5% em peso, é geralmente utilizado como reforço em matrizes cimentícias. No entanto, mesmo que em pequenas quantidades, as NFC diluídas em água podem criar um gel estável e uniforme (Zhang; Scherer, 2020).

Alguns estudos relatam o uso de NFC como reforço em compósitos cimentícios, o que tem sido visto na presente revisão de literatura. O Apêndice 1 apresenta o resumo das características gerais das nanofibras utilizadas pelos autores, observa-se entre os estudos que as dimensões das NFC utilizadas variaram na faixa de 10-500 nm de diâmetro, 2-20 nm de largura e chegaram até vários

mícrons de comprimento. No entanto, é importante destacar que na literatura a dimensão transversal das NFC é designada tanto diâmetro como largura. Quanto ao percentual de NFC utilizados como reforço da matriz cimentícia variou entre 0,02% e 3%. Além das denominadas NFC, os estudos designaram outros nomes/tipos de nanofibras celulósicas, como nanofibrilas hidrofílicas de celulose (Zhang; Scherer, 2020), celulose nanofibrilada (Correia *et al.*, 2018) e as NFC bacterianas (Akhlaghi *et al.*, 2020; Barría *et al.*, 2021). Estudos como Cengiz *et al.* (2017) realizaram comparativos entre nanofibras naturais e comerciais. As nanofibras naturais foram derivadas de *Cladophora sp* (algas) que apresenta uma forma residual em um rio. Em geral, as NFC estudadas pelos autores foram utilizadas em matrizes cimentícias de pastas (62%); pastas e concretos (17%); pastas e argamassas (13,7%) – alguns estudos relacionam simultaneamente dois tipos de matrizes. Uma exceção ao trabalho de Panesar *et al.* (2017) que apenas realizou um estudo do tratamento alcalino nas NFC.

Um dos grandes desafios para a utilização de NFC em matrizes cimentícias é a dispersão, desse modo, pré-tratamentos nas nanofibras são de grande importância. A cristalinidade das nanofibrilas é reduzida devido à característica amorfa da lignina e da hemicelulose presentes na celulose, o que também afeta as propriedades mecânicas conferidas aos compósitos cimentícios. Dessa forma, métodos de tratamento químicos ou enzimáticos também são realizados (Dhali *et al.*, 2021).

O pré-tratamento alcalino, também conhecido como mercerização, realizado pelos autores Panesar *et al.* (2017) e Fonseca *et al.* (2019), consiste em expor as nanofibras a uma solução como hidróxido de sódio. Fonseca *et al.* (2019) explicam que o tratamento alcalino foi realizado para melhoria da desfibrilação das fibras de juta em nanofibrilas. Segundo Abdul Khalil *et al.* (2012), o pré-tratamento alcalino também tem como função remover completamente a lignina e a hemicelulose das NFC, porém o tratamento alcalino não é suficiente para remoção dos constituintes celulósicos, neste caso, a remoção posterior de uma lignina residual pode ser feita por meio do método do branqueamento.

O método da homogeneização foi realizado por autores como Hoyos *et al.* (2019), Tang *et al.* (2019), Sun *et al.* (2017), Mejdoub *et al.* (2016) e Jiao *et al.* (2016), e é um tipo de tratamento mecânico para as fibras de celulose que consiste em processos de refino e homogeneização de alta pressão. As fibras são geralmente submetidas a repetidas tensões cíclicas. Conforme Abdul Khalil *et al.* (2012), este tratamento aumenta o potencial de utilização das fibras porque modifica parte da sua morfologia.

O sistema de oxidação mediado por TEMPO também foi mencionado e utilizado por Jiao *et al.* (2016). A oxidação realizada na presença de TEMPO é um método utilizado para modificar a característica hidrofílica da superfície da nanocelulose. No entanto, a eficiência deste tipo de método foi comprovada em NCC, pois eles demonstram uma melhor dispersibilidade devido à introdução de grupos carboxilato densos em suas superfícies (Hassan *et al.*, 2021).

A sonicação é considerado um dos métodos mais utilizados para dispersão de NFC e foi encontrado com incidências na presente revisão, nos estudos de Sun *et al.* (2017), Claramunt *et al.* (2019), Barnat-Hunek *et al.* (2019), Nassiri *et al.* (2021) e Ez-zaki *et al.* (2021) foi apresentado esse tipo de tratamento. Porém, embora a sonicação possa ser eficaz na dispersão da nanocelulose, Guo *et al.* (2020) relataram desafios para este tratamento, como a dificuldade de conversão da nanocelulose adsorvida nas partículas de cimento em nanocelulose livre que possibilita o surgimento de aglomerados de fibras nas matrizes cimentícias.

3.3 NFC em compósitos cimentícios

O Apêndice 2 apresenta o detalhe das propriedades avaliadas na literatura de pastas, argamassas e concreto com NFC. Esta seção apresenta um breve resumo sobre a influência da adição de NFC na hidratação, reologia, retração, propriedades mecânicas (resistência à compressão e flexão), entre outras.

3.3.1 Hidratação

Diversos estudos indicam que o grau de hidratação do cimento aumenta com a presença de NFC, uma vez que promove a hidratação para produzir mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH); portanto, uma melhora nas propriedades mecânicas é apresentada (Mejdoub *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017; Hoyos *et al.*, 2019; Hisseine *et al.*, 2019). Embora nenhum efeito adverso seja relatado no grau de hidratação, há uma influência em sua cinética (Hisseine *et al.*, 2018a).

Jiao *et al.* (2016) indicam que as amostras de pasta de cimento com e sem NFC não apresentam diferenças na hidratação nas primeiras idades (10 horas), uma vez que a superfície exposta das partículas de cimento domina a liberação de calor e há água suficiente ao redor as partículas para hidratação (Lootens; Bentz, 2016). A adição de NFC prolonga os períodos de indução e atrasa os fluxos de pico de calor. Os grupos hidroxila e carboxila das moléculas de celulose são hidrofílicos (Klemm *et al.*, 2011), o átomo de oxigênio presente nesses grupos possui elétrons desemparelhados que podem reagir com o íon cálcio (Ca^{2+}) e formar um complexo hidrofílico que retarda o período de indução de hidratação e endurecimento. Portanto, menos locais de contato são gerados entre as partículas de cimento e a água, diminuindo as taxas de formação de C-S-H e CH (Sedan *et al.*, 2008).

Devido a esse mesmo fenômeno, Goncalves *et al.* (2019) e Kamasamudram *et al.* (2020) relataram haver também uma redução na formação de etringita. Kamasamudram *et al.* (2021a) descobriram que as nanofibras de lignocelulose (LCNF) e as nanofibras de celulose deslignificadas (DCNF) reduzem as quantidades de etringita e CH na pasta de cimento hidratada. No entanto, o NFC com nanopartículas de sílica mostrou aumentar a quantidade de CH, em torno de 4%, devido ao aumento na velocidade de reação do cimento (efeito de enchimento); enquanto, para as amostras de apenas com NFC, uma redução de CH foi observada (Kamasamudram *et al.*, 2020).

Já em tempos prolongados, as NFC liberam água nas regiões próximas e contribuem para a hidratação das partículas de cimento não hidratadas, isso melhora a microestrutura e as propriedades mecânicas das pastas de cimento (Jiao *et al.*, 2016). Nesse sentido, Ez-zaki *et al.* (2021) indicam a mesma tendência ao usar escória granulada de alto-forno moída ativada por álcali com NFC. Kolour *et al.* (2020) indicam que o grau de hidratação aumenta com a presença de NFC após 3 dias. Zhang e Scherer (2020) também mencionam que as NFC melhoram a hidratação do cimento a longo prazo; no entanto, isso pode variar dependendo da fonte de NFC.

Por outro lado, Mejdoub *et al.* (2016), Kamasamudram *et al.* (2020) e Kamasamudram *et al.* (2021b) indicam que as NFC aceleram a hidratação do cimento em estágio inicial como resultado do efeito de nucleação e que esse efeito é maior para o NFC com nanopartículas de sílica. Após 80 h de hidratação, as adições de NFC não mostraram efeitos significativos no grau de hidratação (Kamasamudram *et al.*, 2021a). Kamasamudram *et al.* (2021b) concluem que a influência de NFC na hidratação depende da relação a/c (a concentração de íons alcalinos nos poros depende da relação a/c), onde para uma relação a/c de 0,35 há uma hidratação acelerada nas primeiras idades; enquanto, para uma relação a/c de 0,45, a hidratação não foi tão proeminente.

Embora não sejam relatados efeitos adversos na hidratação, são necessários mais estudos da cinética de hidratação nas primeiras horas, a fim de definir possíveis aplicações na construção, além da análise de outras variáveis como o tipo de cimento, diferentes relações a/c, etc.

3.3.2 Reologia

Todos os estudos que analisaram a reologia da pasta de cimento e concreto com NFC relataram melhorias, como limite elástico e viscosidade (Hisseine *et al.*, 2018a; Bakkari *et al.*, 2019; Ez-zaki *et al.*, 2021). Em geral, as NFC atuam como um agente modificador na viscosidade das pastas de cimento, aumentando seu limite de escoamento com pequenas adições de NFC, isso é atribuído a dois motivos: a) a capacidade de retenção de água, uma vez que a hidrofiliabilidade é uma

característica intrínseca das NFC (Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2018b; Ez-zaki *et al.*, 2021), e b) a formação de redes de NFC, proeminentes em NFC de comprimentos maiores e flexíveis (Hoyos *et al.*, 2019; Nassiri *et al.*, 2021).

Hisseine *et al.* (2018a) e Hisseine *et al.* (2019) indicam que a incorporação de NFC requer o uso de aditivos redutores de água de alta gama (HRWRA), devido à modificação da viscosidade produzida pelas NFC. Isso está associado à hidrofiliabilidade das NFC, aumentando a retenção de água e uma alta área de superfície e alta razão de aspecto das NFC, aumentando a formação das redes de NFC. Sobre este último ponto, Hisseine *et al.* (2018a) descobriram que as redes de NFC aumentam a viscosidade da mistura em baixas taxas de cisalhamento; porém, para altas taxas de cisalhamento, as redes de NFC levaram a uma menor viscosidade, isso devido à racionalização das NFC na direção do fluxo, apresentando um comportamento de desbaste de cisalhamento.

A adição de NFC aumentou o limite elástico da suspensão de cimento de poço de petróleo (CPP), melhorando as propriedades reológicas (Sun *et al.*, 2016). Tang *et al.* (2019) descobriram que a força do gel, o limite elástico e a viscosidade das suspensões de NFC e CPP foram maiores quando comparadas com as suspensões de nanocristais de celulose (NCC), isso porque as NFC têm maior probabilidade de formar a rede de intertravamento. Em outro estudo de NFC com CPP, foi descoberto que a adição de nanoplaquetas de grafeno (NPG) leva a maiores tensões de escoamento no estado fresco (Sun *et al.*, 2019). Observa-se que as NFC têm uma importante influência no comportamento reológico de materiais cimentícios; no entanto, poucos autores consideraram esse aspecto, sendo um ponto importante para futuras pesquisas.

3.3.3 Retração

Zhang e Scherer (2020) demonstraram o uso de NFC para estudar a retração química de pastas cimentícias com alta relação a/c em idades iniciais (3 dias), uma vez que não há efeito químico na hidratação de curto prazo. As NFC criaram uma estrutura estável para suportar as partículas de cimento e permitir que elas se hidratem sem sedimentar.

Kolour *et al.* (2020) descobriram que adicionar uma quantidade de 0,06% de NFC (por peso de cimento) leva a uma redução na retração autógena em até 49% em pastas de cimento com uma relação a/c de 0,30. Para concretos autoadensáveis, Hisseine *et al.* (2018b) relataram que o uso de NFC reduziu as deformações de retração autógena em até 31% em 7 dias.

O uso de NFC com maior nível de grupos carboxila em sistemas de cimento Portland mitiga as alterações dimensionais e fissuras associadas à retração das pastas de cimento (Bakkari *et al.*, 2019).

Os estudos mostram que as NFC reduzem a retração química e autógena, principalmente. No entanto, não há estudos de longo prazo, como retração por secagem e fluência, além de relacionar essas propriedades aos materiais, dosagem, umidade, temperatura, cura, entre outros.

3.3.4 Propriedades mecânicas

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas das pastas cimentícias melhoram com a adição de NFC, devido à retenção de água das NFC e ao aumento do grau de hidratação (cura interna), bem como a maior aderência das NFC e a matriz cimentícia. No entanto, altos teores de NFC são prejudiciais porque aumentam a porosidade e outros fatores devem ser levados em consideração para o desenvolvimento de propriedades mecânicas (Sun *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2018; Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2019; Kolour *et al.*, 2020; Alzoubi *et al.*, 2020).

a) Resistência à compressão: A maioria dos estudos relata um aumento na resistência à compressão com a adição de NFC (Hisseine *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2017). Mejdoub *et al.* (2016) encontraram um aumento na resistência à compressão em mais de 50% com 0,3% de NFC. Nos resultados de Kolour *et al.* (2020) para uma mistura com 0,15% de NFC, houve um aumento de até 31% após 7 dias e, para uma mistura com 0,09% de NFC, houve um aumento de até 16% após 28 dias. Em

concreto autoadensável, Hisseine *et al.* (2018b) indicam uma tendência positiva na adição de NFC, a resistência à compressão aumentou em até 16%.

Kamasamudram *et al.* (2020) demonstraram que a adição de 0,1% de NFC com nanopartículas de sílica aumenta a resistência à compressão em 13% (a 90 dias) em relação ao lote de controle e em 10% em relação ao lote sem nanopartículas de sílica.

A adição de DCNF mostrou um aumento máximo de 15% na resistência à compressão para 0,05% e 0,1% de DCNF após 90 dias de cura. O aumento máximo da resistência à compressão da pasta de cimento curada por 90 dias com a adição de 0,1% de LCNF foi em torno de 16% (Kamasamudram *et al.*, 2021a).

A adição de NFC e material de mudança de fase levaram ao aumento da resistência à compressão da argamassa de cimento, onde o melhor resultado é alcançado com a adição de 0,5% de NFC, devido à redução da porosidade da argamassa (Alzoubi *et al.*, 2020).

Por outro lado, alguns estudos relatam que a adição de NFC não tem um efeito considerável na resistência à compressão de pastas de cimento (Kamasamudram *et al.*, 2021b), até por ser afetada adversamente devido à entrada de ar e aglomeração das NFC (Hisseine *et al.*, 2018b). Embora Nasiri *et al.* (2019) relatam um aumento na resistência à compressão (17-18%) com a adição de NFC, concentrações acima de 0,065% resultaram em pequenas melhorias na resistência em 7 dias e uma diminuição na resistência em 28 dias em comparação com o controle.

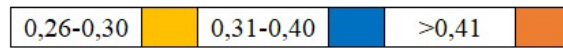
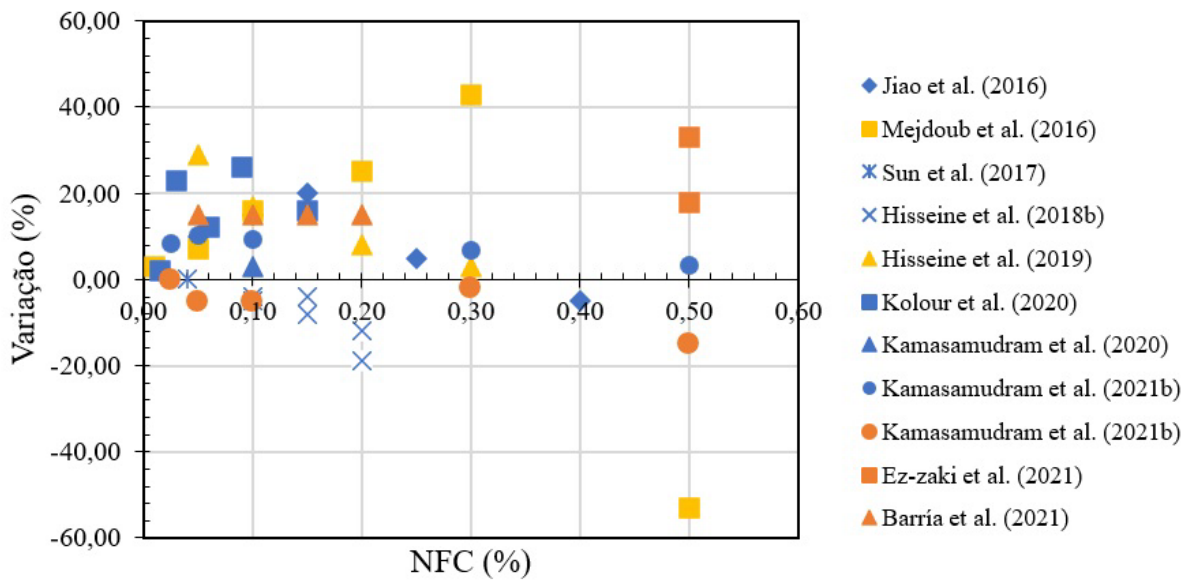
A Figura 4a apresenta o resumo da porcentagem de variação da resistência à compressão aos 28 dias em função da porcentagem de adição de NFC. É importante ressaltar que foram considerados apenas os estudos que disponibilizaram os dados. Quando os resultados da variação são classificados pela relação a/c (Figura 4b), observa-se que quanto menor a relação a/c, maior o percentual de variação positiva, 9,80% para uma relação a/c de 0,26 a 0,30, apresentando um único dado atípico. Adicionalmente, observa-se que, para esta relação a/c, existem apenas percentuais positivos e uma menor dispersão de dados (3-43%). Para as demais relações a/c, a dispersão dos dados é maior e são apresentados valores de redução da resistência à compressão.

b) Resistência à flexão: Para resistência à flexão, um efeito geralmente positivo é relatado (Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2018b; Hisseine *et al.*, 2019). Hisseine *et al.* (2019) descreve um aumento de até 25%. Kamasamudram *et al.* (2020) constataram que, com a adição de 0,1% do NFC, a resistência à flexão aumentou em 70%, valor próximo ao relatado por Kamasamudram *et al.* (2021b), 75%. Porcentagens ainda maiores foram apresentadas por Kolour *et al.* (2020), 116% e Cengiz *et al.* (2017), 169,7%.

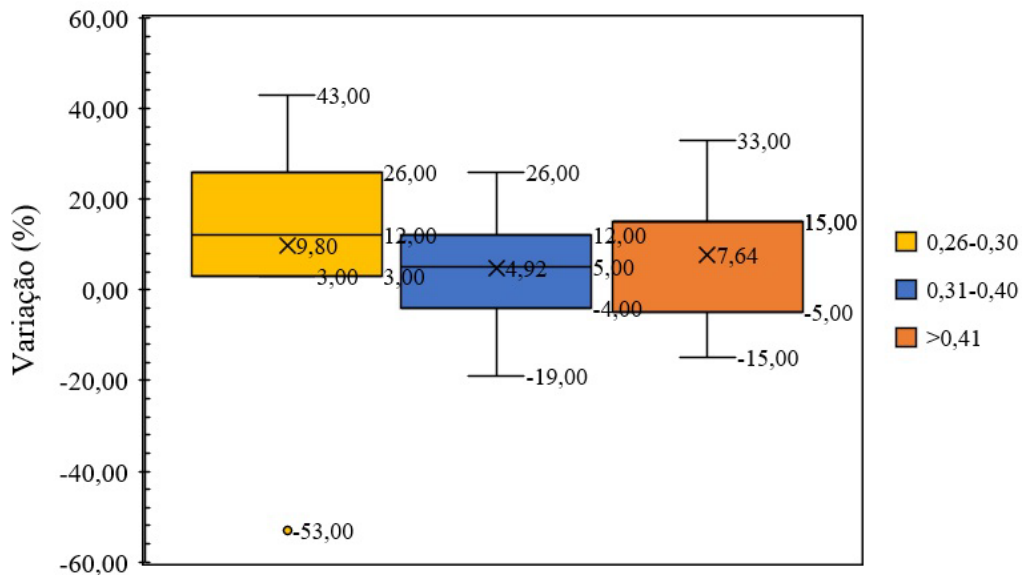
Sun *et al.* (2016) constataram que a flexão aumentou 20,7% para uma relação NFC/PPP de 0,04, atribuído ao aumento da hidratação e ao efeito de ligação dos NFC, mas também apontam que a adição excessiva de NFC é prejudicial devido à aglomeração das nanopartículas. Em trabalho mais recente dos mesmos autores, foi indicado que tanto a resistência à compressão quanto à flexão aumentou com a adição do GNP (2017).

No estudo de Cengiz *et al.* (2017) relata-se que a resistência à flexão em argamassas aumentou 2,7 vezes com a adição de NFC de algas, devido à alta relação de aspecto das NFC, que melhora a interface de ligação entre as NFC e pasta de cimento. No entanto, o uso de NFC comercial tem um efeito negativo sobre a tensão de flexão, devido à sua baixa relação de aspecto e insolubilidade.

Hisseine *et al.* (2018a) indicaram efeitos positivos das NFC no desempenho mecânico das pastas cimentícias, devido à maior homogeneidade e estabilidade. Já no concreto autoadensável, os autores demonstraram que a capacidade de flexão e a resistência à tração na ruptura aumentam em até 21 e 26%, respectivamente. Hisseine *et al.* (2018b) também relatam a mesma tendência no concreto autoadensável, onde todas as propriedades mecânicas medidas foram melhoradas, apenas na flexão 22%, devido ao nanoreforço e cura interna.



(a)



(b)

Figura 4. a) Variação da resistência à compressão aos 28 dias, e b) dispersão de dados considerando a relação a/c.

A resistência à flexão das pastas cimentícias pode aumentar de 20% até 111% com a adição de NFC, este último valor para 0,1% de NFC, tanto para DCNF quanto para LCNF (Kamasamudram et al., 2021a).

A Figura 5a apresenta um detalhamento dos resultados relatados na literatura quanto à resistência à flexão aos 28 dias, observando que a maioria é positiva e com percentuais superiores em relação à resistência à compressão. A Figura 5b mostra que os resultados relatados para uma relação a/c de 0,31 a 0,40, são menos dispersos, com uma média de 29,3% e um único dado atípico (116,67%). Para uma a/c maior que 0,41 há uma média de 69,16%, mas uma maior dispersão dos dados. A dispersão para uma relação a/c de 0,26 a 0,30 não é apresentada, pois, há apenas um estudo dentro

dessa faixa (Claramunt *et al.*, 2019).

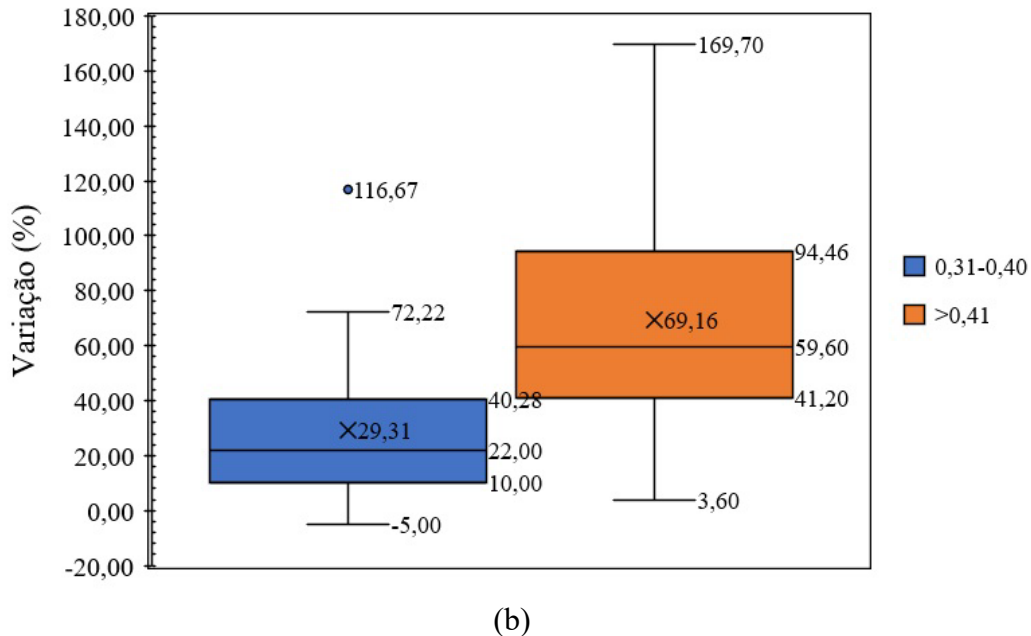
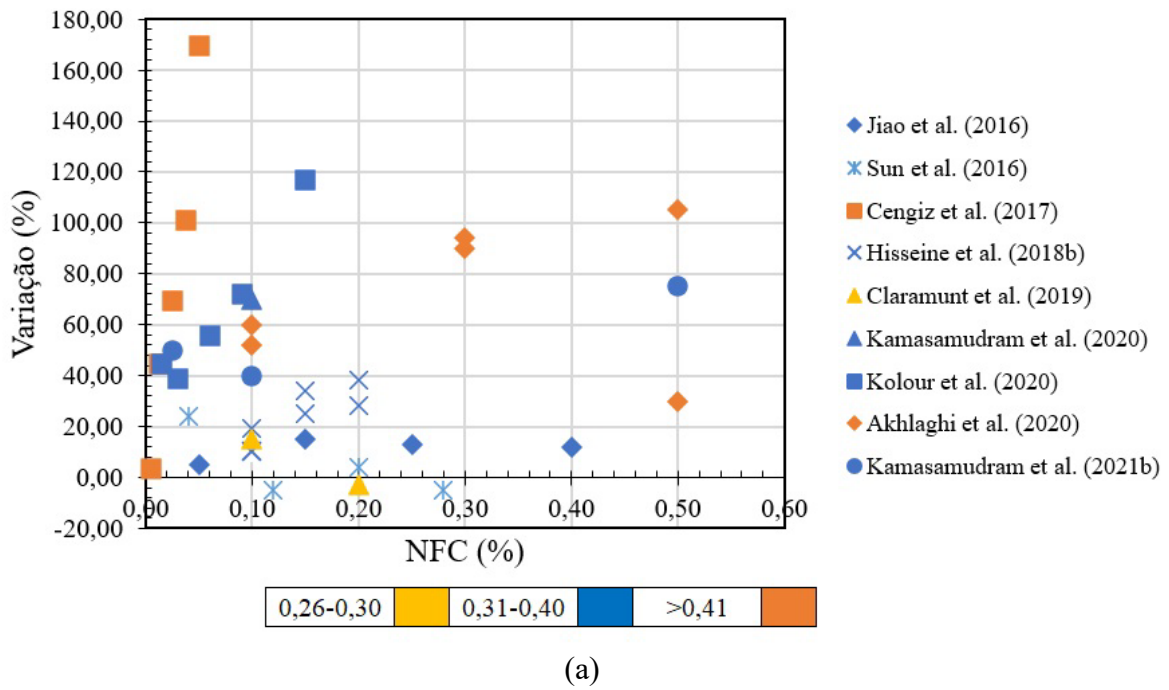


Figura 5. a) Variação da resistência à flexão aos 28 dias, e b) dispersão de dados considerando a relação a/c.

Por fim, a Figura 6 resume todos os resultados reportados na literatura tanto para a resistência à compressão (verde) quanto para a resistência à flexão (vermelho) de concretos e argamassas, mostrando efeitos positivos da adição de NFC, principalmente para resistência à flexão.

c) Mecânica de fratura: Hisseine *et al.* (2019) indica que a capacidade máxima de flexão ocorre com baixo teor de NFC (0,05-0,10%), mas a capacidade de absorção de energia aumenta com maiores teores de NFC, até 74%. Nesse sentido, Hisseine *et al.* (2018b) apontam que as NFC

melhoram a absorção de energia (96%) o que se reflete no aumento do deslocamento máximo, em até 43%, comportamento necessário para estruturas resistentes a impactos e explosões. Aumentos significativos na energia de fratura, 60% no estudo de Kolour *et al.* (2020), sugerem que as NFC são um mecanismo de endurecimento eficaz, atuando como pontes que aumentam a energia necessária para a propagação de trincas.

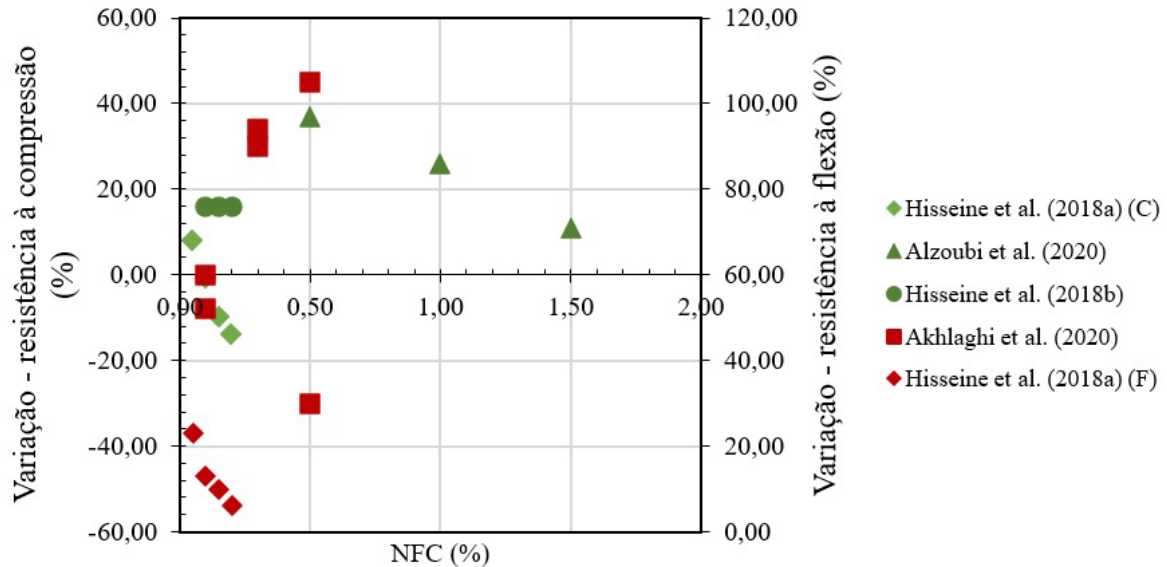


Figura 6. Resistência à compressão e à flexão de concreto e argamassa.

Hisseine *et al.* (2018b) também relatam a mesma tendência no concreto autoadensável, onde todas as propriedades mecânicas medidas foram melhoradas. Foram obtidas melhorias de até 16% na compressão, 34% na tensão de divisão, 22% na flexão e 96% na absorção de energia. Essas melhorias foram atribuídas a dois efeitos transmitidos pelas NFC: nano resistência e cura interna. O teor de 1% de NFC com 8% de polpa celulósica colabora na formação de pontes de transferência de tensões em nano e microfissuras, melhorando o desempenho mecânico dos compósitos antes e depois dos ensaios de envelhecimento acelerado: módulo de ruptura (MOR), tenacidade à fratura (KIC) e energia de fratura (FE), resultados atribuídos à aderência entre o NFC e a matriz de cimento (Correia *et al.*, 2018).

Compósitos reforçados com 2% de micro/nanofibras de celulose apresentaram maior limite de proporcionalidade (LOP), MOR e tenacidade do que os compostos de controle após 28 dias de cura (Fonseca *et al.*, 2019). Ez-zaki *et al.* (2021) indica que as NFC têm a capacidade de inchar, criando depósitos de água internos e podem se comportar como concentradores de estresse, causando o início de microfissuras.

A adição de baixos teores de NFC e NCC (entre 0,1 e 0,2% em peso), em sistemas de cimento de aluminato de cálcio (CAC), levou a um aumento geral nos valores de MOR em amostras não envelhecidas, ao contrário dos sistemas de cimento Portland (Claramunt *et al.*, 2019).

Na literatura, observa-se que as propriedades mecânicas têm sido amplamente investigadas, o que possibilita identificar tendências e entender melhor o efeito das NFC no comportamento mecânico de materiais cimentícios. No entanto, a maioria dos estudos apenas relatou resultados de resistência à compressão e flexão para pastas. O comportamento mecânico em outras aplicações específicas e de longo prazo ainda precisa ser explorado.

3.3.5 Outras propriedades

Neste tópico são apresentadas outras propriedades que têm sido investigadas em alguns trabalhos publicados, destacando que a durabilidade dos materiais cimentícios com NFC é o aspecto menos pesquisado, mas com crescente interesse nos últimos anos.

a) Penetração de íons sulfato: As NFC reduzem a penetração de íons sulfato dentro de um sistema cimentício. Foi observado que a adição de NFC (0,3–0,4%) ao cimento Portland Tipo GU proporcionou a mesma ou maior resistência ao ataque de sulfato do que um cimento Portland tipo HS especialmente formulado (Goncalves *et al.*, 2019).

b) Entrada de íons cloreto: O uso de NFC impede a penetração de íons cloreto. É atribuído à quantidade de grupos carboxila, que levam à restrição da entrada de cloreto, além de melhorar a trabalhabilidade (Goncalves *et al.*, 2020).

c) Módulo elástico: Kamasamudram *et al.* (2021b) observaram que 0,025% e 0,5% de NFC aumentaram o módulo de elasticidade da pasta de cimento em cerca de 200% e 250%. Hisseine *et al.* (2019) relataram um aumento de 18% e Fonseca *et al.* (2019) indicam que, em geral, compostos com NFC apresentam melhor desempenho mecânico e que o módulo de elasticidade dinâmico aumenta com o tempo mesmo quando expostos à intempérie. As NFC com cimento de aluminato de cálcio (CAC) apresentam um aumento no módulo de elasticidade em relação às misturas com cimento Portland (Claramunt *et al.*, 2019).

d) Porosidade: Mejdoub *et al.* (2016) indicaram que a porosidade em pastas de cimento foi reduzida com a adição de NFC, sendo o melhor resultado com 0,3% de NFC. Por outro lado, Goncalves *et al.* (2019) apontam que as NFC refinam o tamanho dos poros, registrando um aumento no volume total de micro e nanoporos; no entanto, houve uma redução da porosidade para tamanhos maiores que 10 mm.

e) Coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica: O uso de NFC aumentou tanto o coeficiente de expansão térmica quanto a condutividade térmica das pastas cimentícias, principalmente devido ao potencial das NFC em reduzir a porosidade e melhorar a microestrutura da matriz cimentícia (Mejdoub *et al.*, 2016). Alzoubi *et al.* (2020) também relataram um aumento na condutividade térmica de compostos PCM/NFC.

f) Exsudação: As NFC atuam como um agente de retenção de água e reservatórios de água para evitar a segregação e exsudação (Ez-zaki *et al.*, 2021). Goncalves *et al.* (2021) mostrou que a adição de NFC reduz significativamente o volume de água de exsudação. As NFC dificultam o assentamento dos grãos de cimento e obstruem a migração ascendente da água livre. No entanto, na presença de superplastificantes, as NFC são menos eficazes na redução da exsudação. Os autores consideram que o efeito de NFC na exsudação atenua a retração plástica, bem como a retração autógena durante os estágios iniciais de hidratação.

Por fim, notou-se a carência de estudos de avaliação dos impactos ambientais de compostos cimentícios com NFC; e, nesse sentido, estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) poderiam ser realizados de forma complementar.

4. CONCLUSÕES

Embora o uso de nanofibras de celulose (NFC) na construção civil seja um campo recente, ainda pouco explorado, estudos de NFC como reforço em matrizes cimentícias mostram que a sua utilização pode melhorar o desempenho das propriedades.

Estudos recentes de aplicação de NFC em matrizes cimentícias têm se concentrado em pastas de cimento, com 62% das pesquisas analisadas (para exclusivamente pastas).

Pequenas porcentagens de NFC são adicionadas aos compósitos à base de cimento, teores de reforço que geralmente variam entre 0,02% e 3%. No entanto, há desafios do uso destes materiais quanto à sua dispersão na matriz cimentícia, desse modo, pré-tratamentos nas nanofibras são de

grande importância porque aumentam o seu potencial de utilização. Os tratamentos/dispersão mais utilizados são sonicação, homogeneização, oxidação mediado por TEMPO e o pré-tratamento alcalino das fibras.

Quanto às dimensões das NFC mais utilizadas nas pesquisas foram reportadas faixas de 10-500 nm e 2-20 nm como diâmetro e largura, respectivamente.

A adição de NFC possibilita, de forma geral, um aumento do grau de hidratação do cimento, melhoria de propriedades reológicas, como viscosidade e limite elástico, favorece a retenção de água da mistura com indícios de redução da segregação e exsudação, além de melhorar o desempenho na retração de compósitos cimentícios.

A maioria dos estudos indica uma tendência de aumento em propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à flexão, mecânica de fratura e módulo de elasticidade. Com um destaque para a propriedade de resistência à flexão, com avanços nos resultados ainda mais positivos se comparados à resistência à compressão.

É importante ressaltar que a boa dispersão das fibras, homogeneidade da matriz e teor de NFC utilizado tem bastante influência nestas avaliações; contudo, uma maior incorporação tende a formar aglomerados de fibras ocasionando decrementos ou sendo prejudiciais aos resultados.

5. REFERÊNCIAS

- Abdellaoui, H., Bouhfid, R. (2020), *Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials*. In Sustainable Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources, 155-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816789-2.00007-9>
- Abdul Khalil, H. P. S., et al. (2012), *Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review*. Carbohydrate Polymers. 87(2):963–979. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>
- Akhlaghi, M. A., et al. (2020), *Application of bacterial nanocellulose fibers as reinforcement in cement composites*. Construction and Building Materials. 241:118061. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118061>
- Alzoubi, H. H., et al. (2020), *Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nanofibers*. Construction and Building Materials. 236:117483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117483>
- Bakkari, M., et al. (2019), *Preparation of cellulose nanofibers by TEMPO-oxidation of bleached chemi-thermomechanical pulp for cement applications*. Carbohydrate Polymers. 203:238–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.036>
- Barnat-Hunek, D., et al. (2019), *Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete*. Construction and Building Materials. 223:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145>
- Barria, J. C., et al. (2021), *Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement*. Journal of Petroleum Science and Engineering. 199. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108259>
- Cao, Z., et al. (2020), *The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle*. Nature communications. 11(1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- Cengiz, A., et al (2017), *Flexural stress enhancement of concrete by incorporation of algal cellulose nanofibers*. Construction and Building Materials. 149:289–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.104>
- Claramunt, J., et al. (2019), *Effect of nanocelluloses on the microstructure and mechanical performance of CAC cementitious matrices*. Cement and Concrete Research. 119:64–76, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.006>
- Correia, V. C., et al., (2018), *Nanofibrillated cellulose and cellulosic pulp for reinforcement of the extruded cement based materials*. Construction and Building Materials. 160:376–384.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.066>

Dhali, K., *et al.* (2021), A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability. *Science of the Total Environment*. 775:145871.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145871>

Dongre, M., Suryawanshi, V. B. (2021), *Analysis of cellulose based nanocomposites & potential applications*. *Materials Today: Proceedings*. 45:3476–3482.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.943>

UN Environment, *et al.*, (2018), *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*. 114:2-26.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Ez-zaki, H., *et al.* (2021), *Correction to: Influence of cellulose nanofibrils on the rheology, microstructure and strength of alkali activated ground granulated blast-furnace slag: a comparison with ordinary Portland cement*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 54(2).

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01665-2>

Fonseca, C. S., *et al.* (2019), *Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites*. *Construction and Building Materials*. 211:517–527.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236>

Goncalves, J., *et al.* (2019), *Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems*. *Cement and Concrete Composites*. 99:100–111.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005>

Goncalves, J., *et al.* (2021), *Turbidity-based measurement of bleeding in fresh cement paste as affected by cellulose nanofibres*. *Cement and Concrete Composites*. 123:104197.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104197>

Goncalves, J., *et al.* (2020), *Cellulose nanofibres mitigate chloride ion ingress in cement-based systems*. *Cement and Concrete Composites*. 114.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103780>

Guo, A., *et al.* (2020), *A Review on the Application of Nanocellulose in Cementitious Materials*.

Nanomaterials. 10(12):2476. <https://doi.org/10.3390/nano10122476>

Hassan, S. H., *et al.* (2021), *TEMPO-oxidized nanocellulose films derived from coconut residues: Physicochemical, mechanical and electrical properties*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 180:392–402.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.066>

Hisseine, O. A., *et al.* (2018a) *Feasibility of using cellulose filaments as a viscosity modifying agent in self-consolidating concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 94:327–340.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.009>

Hisseine, O. A., *et al.* (2018b), *Influence of cellulose filaments on cement paste and concrete*. *Journal of materials in civil engineering*. 30(6):04018109.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002287](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002287)

Hisseine, O. A., *et al.* (2019), *Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems*.

Construction and Building Materials. 206:84–96.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042>

Hoyos, C. G., *et al.* (2019), *Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive*. *Journal of Cleaner Production*. 235:1540–1548.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.292>








Jiao, L., *et al.* (2016), *Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement*. *PLoS ONE*. 11(12):e0168422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168422>

Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021), *Cellulose Nanocomposites for Performance Enhancement of Ordinary Portland Cement-Based Materials*. *Transportation Research Record*.

<https://doi.org/10.1177/0361198120958421>

- Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021a), *Effects of ligno- and delignified- cellulose nanofibrils on the performance of cement-based materials*. Journal of Materials Research and Technology. 13: 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.090>
- Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021b), *Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems*. Construction and Building Materials. 285:121547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121547>
- Klemm, D., *et al.* (2011), *Nanocelluloses: a new family of nature-based materials*. Angewandte Chemie International Edition. 50(24):5438-5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- Kolour, H., *et al.* (2020), *Hydration and early age properties of cement pastes modified with cellulose nanofibrils*. Transportation Research Record. 0361198120945993. <https://doi.org/10.1177/0361198120945993>
- Lootens, D., Bentz, D. P. (2016), *On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials*. Cement and Concrete Composites. 68:9-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.010>
- Mejdoub, R., *et al.* (2016), *Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties*. Journal of Composite Materials. 51(17):2491-2503. <https://doi.org/10.1177/0021998316672090>
- Nassiri, S., *et al.* (2021), *Comparison of unique effects of two contrasting types of cellulose nanomaterials on setting time, rheology, and compressive strength of cement paste*. Cement and Concrete Composites. 123:104201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104201>
- Nishimura, T., *et al.* (2019), *Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement*. Materials. 12(19):3077. <https://doi.org/10.3390/ma12193077>
- Ogura, I., *et al.* (2020), *Measurements of cellulose nanofiber emissions and potential exposures at a production facility*. NanoImpact. 20:100273. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100273>
- Panesar, D., *et al.* (2017), *The effect of sodium hydroxide surface treatment on the tensile strength and elastic modulus of cellulose nanofiber*. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites. 17–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00002-4>
- Santos, R. F., *et al.* (2021), *Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: A review*. Construction and Building Materials. 288:123122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123122>
- Sedan, D., *et al.* (2008), *Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction*. Journal of the European Ceramic Society. 28(1):183-192. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>
- Sun, X., *et al.* (2017), *Rheology, curing temperature and mechanical performance of oil well cement: Combined effect of cellulose nanofibers and graphene nano-platelets*. Materials & Design. 114:92-101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.050>
- Sun, X., *et al.* (2016), *Cellulose nanofibers as a modifier for rheology, curing and mechanical performance of oil well cement*. Scientific reports. 6(1):1-9. <https://doi.org/10.1038/srep31654>
- Tang, Z., *et al.* (2019), *Influence of cellulose nanoparticles on rheological behavior of oil well cement-water slurries*. Materials. 12(2):291. <https://doi.org/10.3390/ma12020291>
- Zhang, S., *et al.* (2021), *High-flexural-strength of geopolymer composites with self-assembled nanofiber networks*. Ceramics International. 47(22):31389–31398. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.014>
- Zhang, Z., Scherer, G. W. (2020), *Measuring chemical shrinkage of ordinary Portland cement pastes with high water-to-cement ratios by adding cellulose nanofibrils*. Cement and Concrete Composites. 111:103625. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103625>

Análise das características do concreto com a substituição do agregado miúdo natural por resíduos sólidos industriais

M. L. A. S. Costa^{1*} , D. C. P. Valões² , C. F. G. Nascimento³ ,
E. G. S. Lima¹ , G. R. Silva¹ , T. T. S. Silva¹ , T. S. Santos¹ 

* Autor de Contato: luizmarcus3@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.573>

Recepção: 17/12/2021 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

O objetivo desse estudo compreende na utilização de resíduos sólidos industriais quanto à melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. Para tanto, foi avaliado a incorporação do pó de “brita” granítica e pó de mármore na confecção de compósitos à base de cimento, substituindo parcialmente o agregado miúdo natural em teores de 50% e 100%. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, além da avaliação da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova. Os resultados evidenciaram que as misturas contendo 50% de agregado reciclado confere ao material uma resistência à compressão de 29,09 MPa, ou seja, 4% superior quando comparado com as misturas de referência, tornando os resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade dos agregados reciclados em peças de concreto.

Palavras-chave: concreto; resíduos sólidos; propriedades mecânicas; sustentabilidade.

Citar como: Costa, M. L. A. S., Valões, D. C. P., Nascimento, C. F. G., Silva, G. R., Lima, E. G. S., Silva, T. T. S., Santos, T. S., (2022), “Análise das características do concreto com a substituição do agregado miúdo natural por resíduos sólidos industriais”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 328 – 346, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.573>

¹ Laboratório de Materiais de Construção Civil, Faculdade de Integração do Sertão, Serra Talhada/PE, Brasil.

² Laboratório Avançado de Materiais de Construção Civil, Universidade de Pernambuco, Recife/PE, Brasil.

³ Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores M. L. A. S. Costa e D. C. P. Valões, contribuíram para a ideia original do estudo, desenvolvimento e análise dos resultados, supervisão e orientações para o trabalho. Os autores E. G. S. Lima, G. R. Silva e T. T. Silva contribuíram com 40%, 30% e 30% da coleta de dados, respectivamente. Os autores C. F. G. Nascimento e T. S. Santos, foram responsáveis pelo aprimoramento do conteúdo da pesquisa, discussões e conclusões.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Análisis de las características del hormigón con la sustitución del árido fino natural por residuos sólidos industriales

RESUMEN

El objetivo de este estudio incluye el uso de residuos industriales sólidos para mejorar las propiedades mecánicas de los composites cementicios. Para ello, se evaluó la incorporación de polvo de grava de granito y polvo de mármol en la fabricación de composites cementosos, sustituyendo parcialmente el árido fino natural en niveles del 50% y del 100%. Para ello, se realizaron ensayos de caracterización de los áridos, además de la evaluación de la resistencia a compresión axial de las probetas. Los resultados mostraron que las mezclas que contenían 50% de agregado reciclado dieron al material una resistencia a la compresión de 29,09 MPa, es decir, un 4% mayor en comparación con las mezclas de referencia, por lo que los resultados fueron satisfactorios, demostrando la viabilidad de los agregados reciclados en las piezas de hormigón.

Palabras clave: Hormigón; residuos sólidos; propiedades mecánicas; sostenibilidad.

Analysis of concrete characteristics with the replacement of natural fine aggregate by industrial solid waste

ABSTRACT

The objective of this study includes the use of solid industrial waste to improve the mechanical properties of cementitious composites. To this end, the incorporation of granite gravel dust and marble dust in the manufacture of cement-based composites was evaluated, partially replacing the natural fine aggregate at levels of 50% and 100%. For this, characterization tests of the aggregates were performed, besides the evaluation of the axial compressive strength of the specimens. The results showed that the mixtures containing 50% recycled aggregate gave the material a compressive strength of 29.09 MPa, i.e., 4% higher when compared to the reference mixtures, making the results satisfactory, demonstrating the feasibility of recycled aggregates in concrete pieces.

Keywords: Concrete; Solid Waste; Mechanical Properties; Sustainability.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios são os materiais mais utilizados e difundidos no mundo devido as suas propriedades físicas e mecânicas, na qual abrange questionamentos sobre durabilidade. Fatores como estes, estimulam o interesse na descoberta de novas tecnologias e de novos compostos como propostas para a melhoria de algumas propriedades (Mechtcherine et al., 2020; Nguyen; Castel, 2020).

A durabilidade do concreto é uma questão essencial, pois permite compreender o desempenho do material durante toda a vida útil de uma estrutura (Kashani et al., 2017). Além disso, ela pode ser afetada pela ação de agentes agressivos externos, como íons cloreto e (CO₂) – dióxido de carbono (Nascimento et al., 2021).

De acordo com Azevedo et al., (2020) a construção civil, apesar de ter uma grande importância na economia, é a maior consumidora no mundo de matérias primas naturais entre os setores industriais. Esse consumo estima-se de 40% a 75% da matéria-prima produzida no planeta. Oliveira et al., (2020), destacam que o impacto da indústria no meio ambiente envolve, desde a exploração da matéria prima, até a sua utilização o que pode gerar resíduos sólidos.

Como uma forma de reduzir o impacto negativo no meio ambiente gerado por essa disposição e o uso de matéria-prima natural na fabricação de compósitos cimentícios, o pó de brita granítica e de mármore têm sido materiais com grande potencial a ser reinserido como agregados no ciclo de produção da indústria da construção civil.

Apesar da grande geração de resíduos sólidos, a construção civil é a indústria que mais pode absorver esses resíduos em forma de agregados em compósitos cimentícios. Tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado de agregados é voltada para o emprego em concretos e argamassas. Estes resíduos podem ser reciclados e reutilizados na própria obra, ou também podem ser encaminhados a usinas de reciclagem e, posteriormente, serem adquiridos como agregados, em diferentes granulometrias, por um custo reduzido (Brandão et al., 2021).

Apesar de pesquisas demonstrarem a viabilidade do uso desses resíduos, alcançando resultados bastante significativos para as propriedades físicas e mecânicas, as normas nacionais permitem o uso dos agregados reciclados apenas em compósitos de baixa resistência, ou seja, em materiais à base de cimento não estruturais (Mohajerani et al., 2020).

Geralmente os resíduos de concreto são utilizados nos compósitos cimentícios como material substituindo parcialmente ou totalmente os agregados naturais. Após ser descartado, o material passa pelo processo de beneficiamento, consistindo na redução do tamanho do material em granulometrias semelhantes à dos agregados naturais, os quais são utilizados como materiais substitutos para produção dos compósitos cimentícios (Klepa et al., 2019).

O percentual de substituição utilizado nas pesquisas é bastante heterogêneo, variando entre 10% a 100%. A relação água/cimento dos traços utilizada pelos pesquisadores variam de acordo com o percentual de substituição adotado. A maior relação (a/c) observada foi de 1,2 e a menor foi de 0,35 (Andrade et al., 2018).

De acordo com Cipriano et al., (2021) e Silva et al., (2021) o aumento da relação (a/c) se deve à necessidade de manter a trabalhabilidade do material, e a este fato talvez esteja atribuída a maior absorção de água dos agregados reciclados, que implica na migração de água para os agregados reduzindo a quantidade de água que contribui para a trabalhabilidade do concreto. Uma forma de conferir uma maior trabalhabilidade aos concretos com agregado reciclado, mantendo a relação (a/c) constante e igual a do concreto convencional, é através do uso de aditivos superplastificantes. Varadharajan, Jaiswal e Verma (2020) analisaram a durabilidade e a resistência do concreto com 5%, 10%, 15% de pó de mármore em substituição ao agregado miúdo, além de uma relação água/cimento (a/c) de 0,43. O estudo revelou uma melhoria na resistência à compressão de, aproximadamente, 35 MPa aos 28 dias, ou seja, 15% maior quando comparados aos compósitos de

referência.

Zhen e Liu (2021), analisaram o comportamento dos compósitos cimentícios utilizando percentuais de 10%, 20% e 30% de pó de brita granítica em substituição parcial do agregado miúdo. Os pesquisadores observaram que as misturas contendo 30% de pó de brita, tiveram uma melhoria na resistência à compressão axial aos 28 dias de 20%, resultando em 50 MPa quando comparadas com os compósitos de referência.

As pesquisas realizadas por Thapa e Waldmann (2021), evidenciaram a eficácia dos compósitos cimentícios utilizando 10%, 20% e 30% de pó de brita granítica. Os autores perceberam que a utilização de 30% do material reciclado possibilitou a melhoria da resistência à compressão axial nas misturas de concreto, sendo observado aos 90 dias, 58,1 MPa.

Aliabdo, Elmoaty e Auda (2014), realizaram ensaios mecânicos em concretos utilizando 0%, 5%, 7,5%, 10% e 15% de pó de mármore em compósitos à base de cimento em diferentes tempos de cura. Para a relação água/cimento (a/c) de 0,50 foi reportado um aumento da resistência à tração na flexão na mistura contendo pó de mármore de, aproximadamente, 10% em comparação com a mistura de referência. Para todos os tempos de cura, a resistência máxima à tração na flexão foi atingida a 7,5% e mínima a 15% de substituição.

Os dados obtidos nesse estudo não corroboraram com os obtidos por Rodrigues, Brito e Sardinha (2015), onde relatam uma diminuição nos resultados de resistência à compressão axial devido ao aumento dos percentuais de resíduos de pó de mármore. Os autores relataram uma perda máxima de 31% aos 28 dias de cura.

Visando a mitigação dos impactos ambientais resultantes da geração de resíduos, existe atualmente uma grande busca por materiais alternativos que possam ser utilizados como substitutos parciais ou totais dos agregados naturais. Segundo Meena et al., (2021), a quantidade de resíduos sólidos gerados pelas indústrias de construção civil aumentará de 12,7 bilhões de toneladas para 27 bilhões de toneladas até 2050. Com isto, ratifica que a geração e a disposição desordenada de resíduos sólidos na construção civil precisam ser mitigadas, reintroduzindo estes resíduos no ciclo produtivo da própria indústria geradora (Meena et al., 2021; Paiva et al., 2021).

Tendo em vista essa problemática, o objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade para utilização do pó de mármore e do pó de brita granítica, substituindo o agregado miúdo natural na produção de compósitos cimentícios, visando a busca e definição de uma alternativa para uma disposição correta destes resíduos e a diminuição da utilização do agregado miúdo natural, visando mitigar os impactos ambientais causados pelo processo de extração.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este tópico tem como intuito apresentar o cronograma experimental realizado e as respectivas metodologias realizadas para atingir os objetivos deste trabalho, sendo dividido em 8 subtópicos, considerando desde os ensaios iniciais de caracterização dos agregados miúdos até os ensaios finais de trabalhabilidade e resistência à compressão axial. Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Engenharia Civil da Faculdade de Integração do Sertão – FIS, localizada no município de Serra Talhada – PE. O pó de mármore foi coletado em uma empresa (Pedra Bonita Mármore e Granitos) e os demais (pó de brita granítica e agregado miúdo natural) foram adquiridos através de um empreendimento local, e posteriormente, os mesmos foram transportados para o Complexo Laboratorial de Engenharia Civil da Instituição.

2.1 Materiais

O cimento utilizado foi o tipo CP-II-F-32 RS (Resistente a Sulfatos). Este tipo de aglomerante foi escolhido devido a seu rápido ganho de resistência e ausência de aditivos. O teor de adições minerais que contém em outros tipos de cimento, poderia contribuir para o refino e preenchimento

dos poros no interior do concreto, o que dificulta a entrada de agentes agressivos e melhora a durabilidade.

Utilizou-se pó de mármore e pó de brita granítica, onde as frações dos materiais podem ser vistas na (Figura 1 (a) e (b)). Foi utilizado o agregado miúdo natural (areia), de origem quartzosa, utilizada na região (Figura 1 (c)). A areia foi adquirida por uma empresa levando em consideração as características físicas da mesma. O material estava em estado úmido e, portanto, era necessário corrigir seu teor de água por secagem natural.

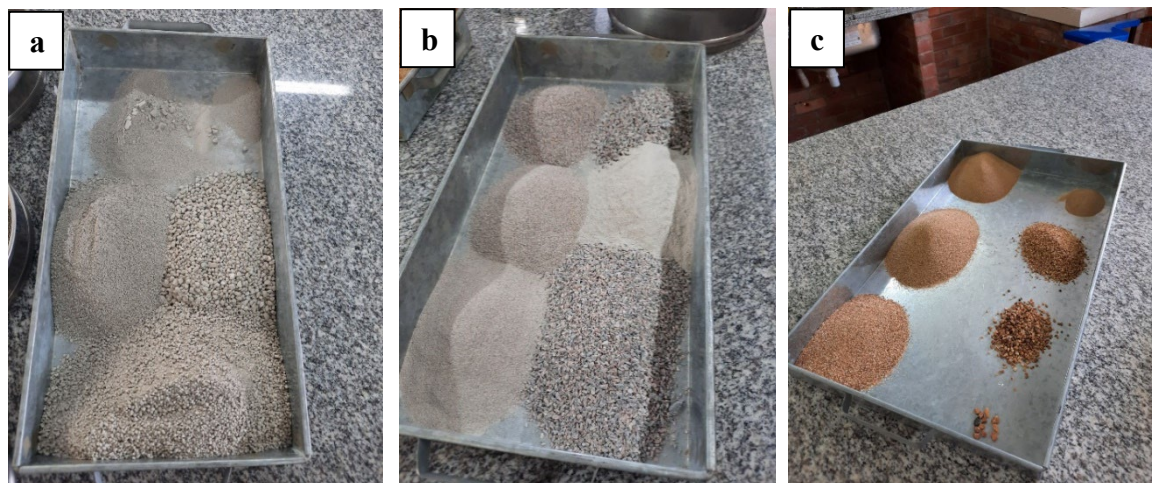


Figura 1. Frações das partículas de pó de mármore (a) pó de brita granítica (b) agregado miúdo natural (c).

O Aditivo utilizado foi o Techniflow 520, de MC Baushemie. Este aditivo plastificante foi utilizado na dosagem matricial do concreto com densidade de massa de 1,08 kg/L.

Os agregados graúdos naturais utilizados possuíam um diâmetro máximo de 19 mm e módulo de finura de 6,48 mm. A curva granulométrica do material não foi exposta nesta pesquisa, mas o tipo de agregado utilizado foi classificado como cascalho 1.

2.2 Métodos

2.2.1 Correção da umidade do agregado miúdo (areia)

Para garantir o teor de umidade, 600 g de material foram dispostos numa estufa por cerca de 24 horas a uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e, após este procedimento, 300 g foram utilizados para o teste de caracterização granulométrica levando em consideração a granulometria do agregado miúdo de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando o conjunto de peneiras em série normal e o agitador de peneiras na frequência 8 hertz, durante 2 minutos. A peneiras utilizadas foram #6,3 mm, #4,8 mm, #2,4 mm, #1,2 mm, #0,60 mm, #0,30 mm e #0,15 mm. Diante da massa retida em cada peneira, foi obtida a Dimensão Máxima Característica – (DMC) que corresponde à abertura nominal, em mm (milímetros), da peneira quanto à série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa – dos agregados miúdos naturais. Além disso, o módulo de finura, que segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003) é a “soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100” – dos agregados miúdos foram obtidos com a utilização da (Equação 1).

$$\omega = \frac{\Sigma \% \text{retida acumulada}}{100} \quad (1)$$

Onde:

ω = módulo de finura do agregado miúdo;

$\Sigma\%retaida acumulada$ = soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal.

2.2.2 Caracterização do agregado miúdo natural

Para análise cristalográfica, o agregado miúdo foi secado para constância de massa em estufa, a uma temperatura de 105 °C e na granulometria mínima apropriada passante na #200/0,075 mm. A técnica de difração de raio-X, utilizada para a caracterização dos agregados, foi realizada através de um difusor D8 Advance, Bruker, que contém um tubo de $K\alpha$ de radiação de cobre com comprimento de onda (λ) de 1.541 Å, corrente de 10 mA e tensão de 30 kV. Os testes foram realizados com a faixa de varredura (STEP) (2θ) variando de 10° a 60°, tempo de 1 segundo e incremento de 1° (grau), velocidade (Scan-Speed) passo angular de 0,02°/segundo e fenda divergente de 1° grau. As fases presentes nas amostras foram posteriormente identificadas com o programa de computador X'Pert HighScore, através do sistema PDF (Powder Diffraction).

2.2.3 Massa específica

Devido à falta do tipo de frasco requerido para realizar o ensaio conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009), como meio alternativo para analisar as massas específicas dos agregados miúdos, foi utilizado o frasco de Chapman, de acordo com a NBR 9776 (ABNT, 1987), sendo a massa específica: “a relação entre a massa do agregado seco em estufa (100 °C a 110 °C) até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis”. Os materiais foram submetidos ao ensaio após 24 horas na estufa a 110 °C. Após a leitura dos resultados, foi aplicada a fórmula (Equação 2) que a norma rege para obter as massas específicas.

$$y = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

Onde:

y = massa específica do agregado miúdo em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

2.2.4 Massa unitária em estado solto

Os ensaios da massa unitária em estado solto dos agregados miúdos foram realizados conforme os parâmetros instituídos pela NBR 7251 (ABNT, 1982). De acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982): “a massa unitária do agregado solto é a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado”. Logo, o ensaio foi realizado 3 vezes para cada tipo de agregado miúdo. O ensaio consistiu em pesar o recipiente seco primeiramente, posteriormente preenchê-lo até seu topo com agregado miúdo e realizar o rasamento da superfície com haste e pesá-lo, posteriormente foram realizados os cálculos necessários utilizando a (Equação 3).

$$\mu = \frac{M_{r+a} - M_r}{V_r} \quad (3)$$

Onde:

μ = massa unitária do agregado no estado solto em kg/dm³;

M_{r+a} = massa do recipiente mais a massa da amostra em kg;

M_r = massa do recipiente em kg;
 V_r = Volume do recipiente em dm^3 .

2.2.5 Dosagem das misturas dos compósitos cimentícios (concreto)

evando em consideração que o município de Serra Talhada – PE se enquadra na classe de agressividade ambiental (CAA) II da NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência estabelecida para os traços de concreto do presente trabalho foi de 25MPa aos 28 dias de idade (cura), com fator de água/cimento de 0,55. Além disso, para execução dos diferentes tipos de misturas foi estabelecido um traço massa volume (TMV) de 1 : 2 : 3 relação (mistura/peso), M% = 55% (conteúdo de argamassa) e A% = 10,5% (relação água-material seco. Para a confecção dos variados tipos de traço de concreto, foi utilizado o cimento Nacional CP II-F-32 RS, a brita 1 e o aditivo plastificante MC-TechniFlow 520 da MC-Bauchemie (também utilizado pela concreteira local) em 0,65% da massa do cimento.

Após os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária serem realizados, foram utilizados os dados obtidos para estabelecer a quantidade definida de cada tipo de material a serem incorporados no concreto, para confeccionar diferentes tipos de traço. Obtendo por exemplo, a quantidade de materiais para produção de $1m^3$ de concreto do traço referencial, sendo: 352,36 kg de cimento/aglomerante; 740,66 kg de agregado miúdo; 1133,89 kg de agregado graúdo; e 193,79 litros de água ($a/c = 0,55$). O mesmo processo foi realizado com os demais traços utilizando os valores obtidos de massa unitária em estado solto e da massa específica.

Para realização da pesquisa, foram executados 3 tipos de misturas de concreto diferentes, conforme apresentados na (Tabela 1), onde: a mistura 1, sendo o traço convencional com utilização de 100% de areia natural como agregado miúdo; a mistura 2, sendo o traço com substituição de 50% do volume da areia por pó de mármore (10%) e por pó de brita granítica (40%); e a mistura 3, sendo o traço com a substituição total (100%) da areia pelos resíduos sólidos industriais, pó de mármore (15%) e pó de brita granítica (85%).

Os percentuais de pó de mármore e pó de brita granítica utilizados na pesquisa, foram definidos com o intuito de compreender o comportamento mecânico de um composto cimentício (concreto) ao se utilizar 100% de agregados reciclados industriais. O foco principal do estudo não foi analisar o percentual ótimo a ser utilizado em compósitos com matrizes cimentícias diferentes, mas sim as propriedades desses materiais que não são definidos pelas normativas nacionais.

Tabela 1. Misturas e quantidades de corpos-de-prova analisados em diferentes tempos de cura.

MISTURAS	Total de corpos-de-prova que foram produzidos para serem rompidos por tempo de cura			
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Mistura 1: traço referencial, utilizando completamente (100%) a areia natural como agregado miúdo.	10 CP	10 CP	10 CP	10 CP
Mistura 2: substituindo parcialmente (50%) a areia natural por pó de brita granítica (40%) e pó de mármore (10%).	10 CP	10 CP	10 CP	10 CP
Mistura 3: substituindo completamente (100%) a areia natural por pó de brita granítica (85%) e pó de mármore (15%).	10 CP	10 CP	10 CP	10 CP
Total de 120 corpos-de-prova				

2.2.6 Procedimento para execução dos corpos-de-prova de concreto

A produção dos corpos-de-prova foi desenvolvida de acordo com os procedimentos e parâmetros estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Os moldes cilíndricos utilizados, possuíam dimensões de (10 cm x 20 cm) de $D_{diâmetro}$ e H_{altura} respectivamente. Todos os (CP's) produzidos, serviram para realizar as análises através dos ensaios complementares que, por sua vez, foram de suma importância para compreender o comportamento físico-mecânico do material estudado.

Antes de iniciar a separação dos materiais percussores para a produção dos diferentes tipos de concretos, foi-se necessário utilizar um tipo de desmoldante líquido em todas as fôrmas, onde ficou em repouso por 15 minutos, para facilitar a retirada do material hidratado. Após isso, foi preciso realizar a correção de umidade do agregado miúdo (areia), pois influencia diretamente na qualidade e na fluidez do material em estudo. Essa correção implica na redução da quantidade de água utilizada no processo de produção dos corpos-de-prova.

Para tanto, os materiais matriciais como: cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e solvente (água), foram devidamente pesados e direcionados à betoneira de acordo com a correspondente ordem: o agregado graúdo foi levado à betoneira e, após isso, aproximadamente 2/3 da água foi utilizada, onde o processo de mistura durou cerca de 1 minuto. Em seguida, foi adicionado o aglomerante (cimento), o agregado miúdo (areia) e 1/3 da água restante. Todos os materiais passaram por um processo de homogeneização por aproximadamente 5 minutos e, após, este processo, realizou-se o ensaio de consistência (Slump test) denominado, também, como abatimento de tronco de cone conforme os procedimentos instituídos pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Após esses procedimentos, os corpos-de-prova foram moldados conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Primeiramente, os concretos foram introduzidos em duas camadas nos moldes, sendo cada uma delas adensadas a partir da aplicação de 15 golpes distribuídos uniformemente com uma haste metálica, sem afetar a base. Além disso, a face externa dos moldes foi levemente batida com o intuito de minimizar os vazios ocasionados pelo adensamento. Por fim, a última camada foi moldada com uma determinada quantidade de material, afim de exceder o volume do molde, para facilitar o rasamento com uma régua metálica, sem adicionar material após o adensamento. Depois de moldados os corpos-de-prova, os mesmos foram cobertos por um material impermeável não reativo e não absorvente para que não houvesse perda de água do concreto (membrana plástica).

Após concluída a moldagem dos concretos, os corpos-de-prova foram levados a uma sala com temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, dos quais permaneceram durante 24 horas para que o processo de hidratação fosse concluído com êxito e, após esse período, foram desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida em um recipiente com a presença de água em estado estático com umidade relativa do ar superior a 95% até o momento dos ensaios.

2.2.7 Ensaio de consistência (slump test)

Foi realizado para cada traço, o ensaio de consistência (slump test) caracterizado como abatimento de tronco de cone de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Esse ensaio, teve como finalidade, avaliar a trabalhabilidade do concreto, no que diz respeito à mobilidade do aglomerante frente à coesão dos materiais constituintes em sua matriz. O (slump test) é composto por uma chapa metálica com dimensões (50 cm x 50 cm) e espessura de 3 mm, um tronco de cone com altura máxima de 300 mm, uma haste metálica com dimensões de 600 mm e diâmetro equivalente a 16 mm.

Para a realização dos procedimentos, primeiramente a chapa e o tronco de cone foram umedecidos e alocados em região plana e livre de vibrações. Após isso, foi coletada uma amostra do concreto a ser analisado e direcionado ao tronco de cone em três camadas. O material foi compactado com a haste, exercendo 25 golpes distribuídos uniformemente sobre cada camada. Esse procedimento

foi repetido outras duas vezes até o topo do molde.

No final do procedimento, foi necessário uniformizar a superfície utilizando a haste de compactação, e limpar a base. Após isso, retirou-se o molde cuidadosamente de forma vertical, onde a norma informa que esse tempo varia entre 5 a 10 segundos. Após a retirada, é necessário medir o abatimento do material dado pela diferença de altura entre o topo do molde (invertido) e o eixo do material desmoldado.

2.2.8 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com os parâmetros estabelecidos prescritos pela NBR 7239 (ABNT, 2018) o qual compreende a determinação do comportamento mecânico do material. Após a moldagem dos corpos-de-prova e transcorridos 7, 14, 21 e 28 dias de cura úmida, os materiais foram submetidos às análises. Todos os corpos-de-prova foram retificados e levados a uma prensa hidráulica da marca SOLOTEST modelo DL 200 com velocidade de aplicação da carga de $0,50 \pm 0,15$ MPa/segundo, carga máxima de 1000 kN, sendo esta, relacionada a 30% aplicada ao fim da carga. O equipamento utilizado foi a prensa hidráulica de capacidade de 200 toneladas, o que fornece os resultados da resistência à compressão axial (F_{ck}) em MegaPascal (MPa) e suas respectivas curvas de ruptura.

3. RESULTADOS

3.1 Análise granulométrica dos agregados

A partir da análise granulométrica dos agregados, verificou-se que o agregado natural miúdo (areia) apresentou um módulo de finura de 2,15 e diâmetro máximo de 4,8 mm, sendo classificado como um agregado de granulometria média. Os agregados reciclados denominados como pó de brita e pó de mármore apresentaram, respectivamente, módulo de finura de 2,73 e 3,88, ambos maiores quando comparados com o agregado miúdo natural. O diâmetro máximo das partículas do agregado reciclado foi de 4,8 mm, podendo ser classificado como material de granulometria média. Cada peneira utilizada apresentou uma fração retida de agregados, onde foram pesados e serviram para projetar a curva granulométrica. Na peneira #6,3 mm não foram retidos materiais; #4,8 mm, 0,29 g; #2,4 mm, 3,03 g; #1,2 mm, 10,88 g; #0,60 mm, 32,26 g; #0,30 mm, 71,38 g; #0,15 mm, 97,32 g.

Quanto ao pó de mármore, o quantitativo de partículas retidas em cada peneira foi de: #4,8 mm, 0,42 g; #2,4 mm, 22,35 g; #1,2 mm, 70,83 g; #0,60 mm, 95,05 g; #0,30 mm, 99,51 g; #0,15 mm, 99,96 g. No que diz respeito ao pó de brita granítica, o quantitativo de partículas retidas em cada peneira foi de: #4,8 mm, 0,16 g; #2,4 mm, 15,77 g; #1,2 mm, 42,70 g; #0,60 mm, 58,78 g; #0,30 mm, 72,17 g; #0,15 mm, 99,96 g. Para ambos, a quantidade total ensaiada foi de 300 g.

A (Figura 2) mostra as curvas de distribuição granulométrica do agregado miúdo natural, do pó de mármore e do pó de brita granítica. É possível observar que as curvas do agregado miúdo natural e do pó de brita granítica se comportam de forma semelhante, ambas podendo ser utilizadas dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2019), como também observado por Barros e Fucale (2016), que utilizaram agregados reciclados na produção de concreto. Entretanto, a curva referente ao pó de mármore não se enquadra dentro dos limites estabelecidos pela norma, apresentando partículas com dimensões de 1,18; 0,6 e 0,3 mm em excesso.

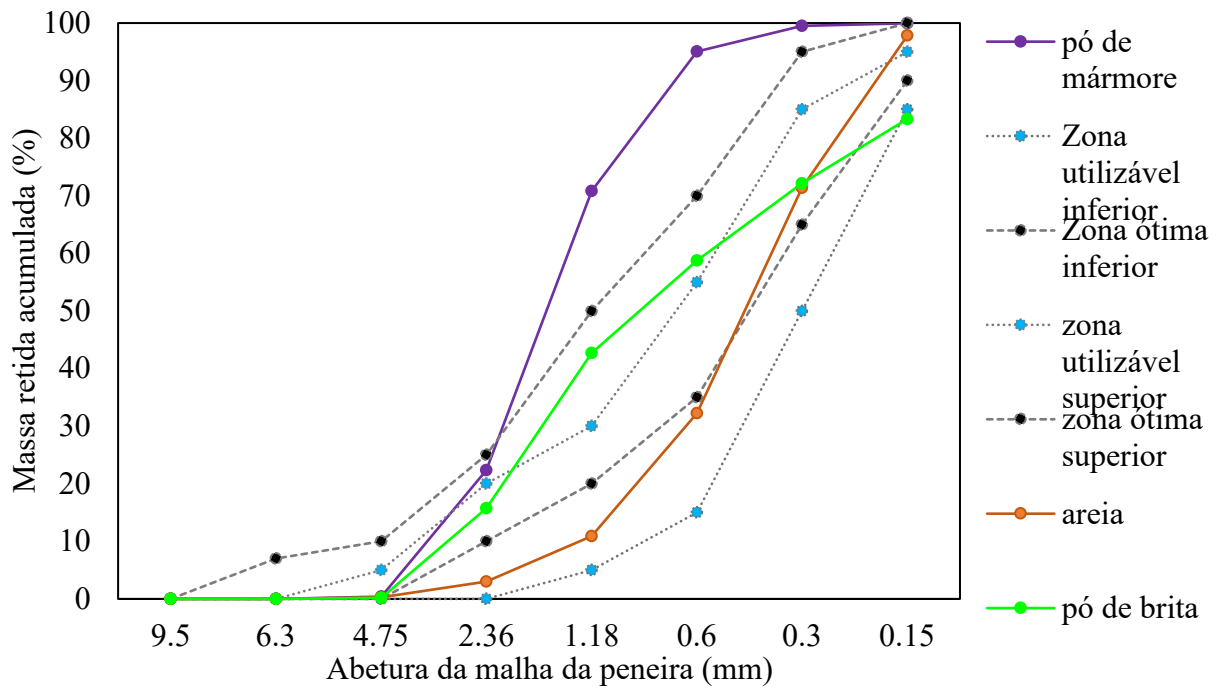


Figura 2. Distribuição granulométrica dos agregados.

Foi realizado o ensaio de teor de material pulverulento. A areia natural apresentou um teor de material fino de 7%, enquanto o pó de mármore e o pó de brita granítica apresentaram uma taxa de 12,5% e 10,3%, respectivamente, mostrando um aumento de mais de 50% em relação ao agregado natural. Entretanto, apesar dos agregados reciclados apresentarem um teor de material pulverulento alto, este resultado permite que este acréscimo se mantenha dentro do limite estabelecido pela norma de agregados reciclados de resíduos sólidos conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004), não excedendo 20%.

Conforme Souza (2019), os agregados de granulometria contínua, que não apresentam excesso ou deficiências de partículas de qualquer dimensão, produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas, todavia, deve-se avaliar as demais características dos agregados, tais como a dimensão máxima característica e o módulo de finura. Na (Tabela 2), estão apresentados os resultados dos demais ensaios de caracterização dos agregados miúdos.

Tabela 2. Módulo de finura, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária em estado solto dos agregados miúdos utilizados no trabalho.

Característica	Areia natural	Pó de brita granítica	Pó de mármore
Módulo de finura:	2,15	2,73	3,88
Dimensão máxima característica (DMC):	4,8	4,8	4,8
Massa específica (g/cm ³):	2,63	2,65	2,74
Massa unitária em estado solto (g/cm ³):	1,46	1,62	0,94
Os valores limites de módulo de finura dos agregados conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) são:			
NOTA 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.			
NOTA 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.			
NOTA 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.			

Conforme os dados apresentados na (Tabela 2), comparando os valores de módulo de finura dos agregados com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), tanto a areia natural quanto o pó de brita granítica apresentam módulo de finura dentro das zonas utilizáveis, principalmente o pó de pedra granítica que se enquadra na zona ótima. Entretanto, o pó de mármore não se enquadra na zona utilizável.

As curvas granulométricas dos agregados reciclados foram avaliadas separadamente com a finalidade de compreender como as suas partículas se comportam, do qual auxilia para uma melhor distribuição dos percentuais utilizados. Mesmo utilizadas em conjunto, faz-se necessário uma análise individual como proposto na pesquisa, pois as características desses materiais são diferentes. Uma característica semelhante é a área específica, pois ambas possuem altos teores de materiais finos que, por sua vez, necessitam de um maior percentual de água ou uma maior relação água/cimento (a/c).

Segundo Souza (2019), quanto maior o módulo de finura, maiores são as dimensões do agregado (foi o caso do pó de mármore), além disso, agregados com módulo de finura próximos tendem a produzir compósitos cimentícios com características semelhantes, porém isso depende de outros fatores como por exemplo, a dimensão máxima de cada agregado e a presença de materiais pulverulentos. Ainda conforme o mesmo autor, quanto maior a dimensão máxima característica, menor é a área superficial a ser coberta pela pasta de cimento, o que pode influenciar a redução de custos na fabricação de concreto, porém isto depende de outros fatores, como a presença de materiais pulverulentos.

3.2 Análise da consistência (*slump test*)

Todas as misturas foram avaliadas conforme as suas características físicas que abrangem o comportamento dos materiais cimentícios quanto à trabalhabilidade. Na (Figura 3), as misturas foram analisadas separadamente e os resultados do abatimento do “tronco de cone” foram obtidos em cm. Pode-se perceber que as misturas contendo 50% de resíduos sólidos industriais, possuem comportamento semelhante aos compósitos de referência. Já as misturas contendo 100% tiveram um abatimento de “tronco de cone” de 4 cm, o que indica que o material possui uma maior superfície específica, do qual consome uma maior quantidade de água.

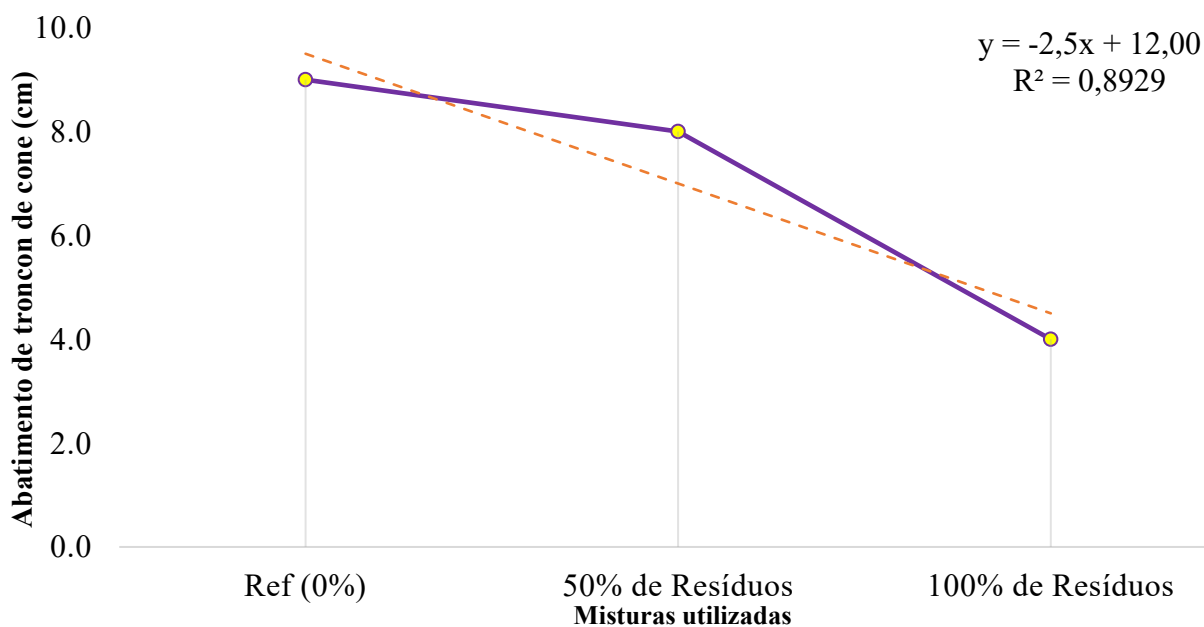


Figura 3. Representação da trabalhabilidade (obtidas por meio do *Slump Test*) dos diferentes tipos de traços.

Apesar de o agregado miúdo natural e o pó de brita apresentarem suas faixas granulométricas dentro dos limites estabelecidos pela norma, nenhuma das 3 (três) misturas apresentaram abatimentos entre 10 cm a 16 cm que, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) seriam ideais para a execução dos elementos estruturais.

Ao observar a (Figura 3), percebe-se que as misturas contendo 50% de resíduos sólidos industriais, apresentaram uma trabalhabilidade cerca de 11,11% inferior quando comparadas às misturas de referência, o que demonstra a sua viabilidade para o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios com finalidade estrutural. Contudo, as misturas contendo 100% de agregados sólidos industriais apresentaram abatimento 55,56% inferior quando comparados às misturas de referência. O pó de mármore apresentou características desfavoráveis ao ser misturado com a água, onde seus grãos foram depositados, formando um material pulverulento. Além disso, o material possuía característica viscosa quando saturado, o que influenciou negativamente na trabalhabilidade dos compósitos cimentícios (concreto).

3.3 Análise da resistência à compressão axial

A utilização de resíduos sólidos industriais na estrutura matricial dos materiais cimentícios (concreto) confere um melhor comportamento físico-mecânico que, por sua vez, preenchem os vazios/interstícios devido à área específica superficial desses materiais, conforme os resultados obtidos através da classificação granulométrica. Todas as análises foram realizadas com 7, 14, 21 e 28 dias e os resultados foram expressos no gráfico representado na (Figura 4).

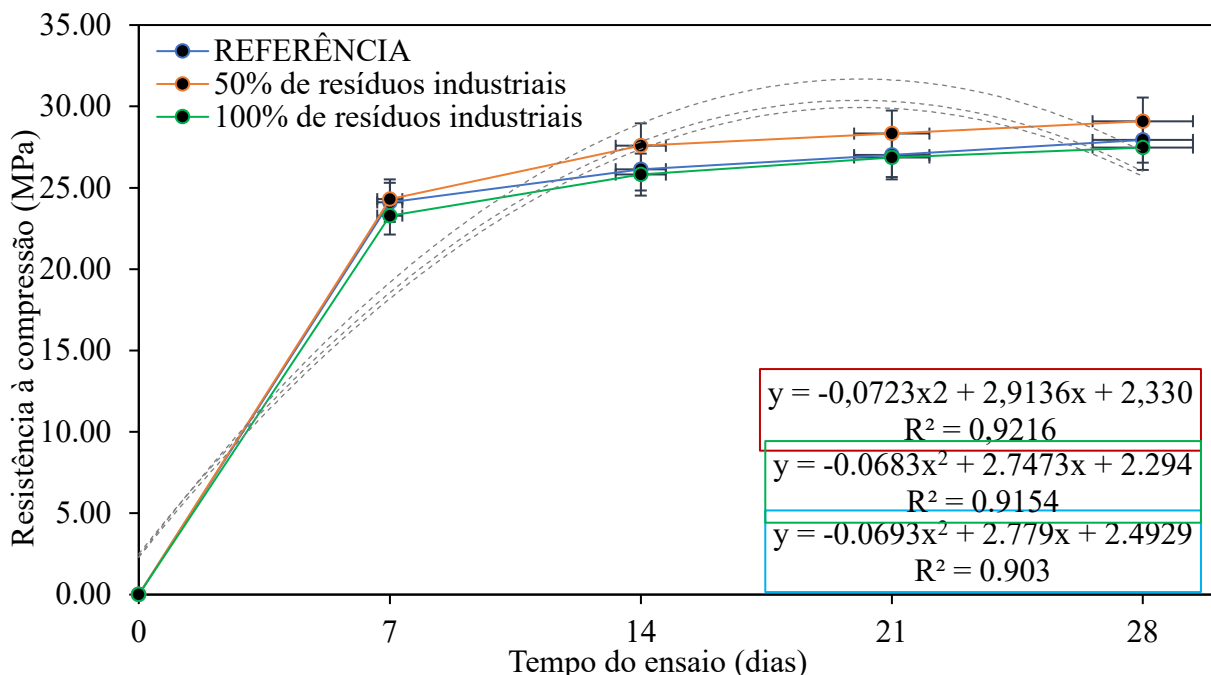


Figura 4. Resistência média à compressão axial dos compósitos cimentícios.

As misturas contendo 50% de resíduos sólidos industriais em sua composição proporcionaram ao material uma maior eficiência mecânica quando comparados aos (CPs) de referência, dos quais, foram maiores que 20 MPa aos 7 dias. Entretanto, os resultados das misturas de referência e com 100% de agregados reciclados possuem comportamentos semelhantes aos 28 dias de análise, onde os valores obtidos foram de 27,94 MPa e 27,47 MPa, respectivamente. É possível notar que todas as misturas possuem correlação amostral significativa, ou seja, os (R^2) variam em torno de 0,900 e 0,920.

Considerando as análises realizadas, observou-se que as misturas contendo 50% de resíduos sólidos industriais proporcionaram um aumento na resistência à compressão aos 28 dias de, aproximadamente, 4% quando comparados as misturas de (REF), sendo este considerado um valor adequado diante da apresentação das características físicas dos materiais em estudo. Esses compósitos conferiram valores mais significativos, entretanto, aos 7 dias, resultaram um comportamento ligeiramente maior quando comparados às misturas de referência.

Quanto às misturas contendo 100% de resíduos sólidos industriais, percebeu-se que aos 28 dias de análise, o mesmo obteve valores de resistência à compressão axial de 27,47 MPa, ou seja, 2% inferior quando comparados com às misturas de referência. Esse comportamento dar-se-á devido ao percentual de materiais finos presentes no material e à relação água/cimento (a/c). Quanto maior o teor de materiais pulverulentos, maior será a absorção de água dificultando a molhabilidade de todas as partículas. Esse processo implica na ausência de uma melhor coesão e, sobretudo, na formação de vazios no interior da matriz cimentícia, levando a perda das propriedades mecânicas. O crescimento da resistência à compressão ocorre linearmente, pois o aumento do teor de partículas de materiais residuais dispersas na matriz cimentícia das misturas com 100%, não coincide com o bom comportamento mecânico do material. Além disso, sabe-se que o aumento do índice de vazios pode provocar pressões no interior do composto hidratado, formando microfissuras que, ao se aplicar uma força, contraem-se nas regiões próximas à zona de transição do agregado/aglomerante. Para melhor representar os dados obtidos e, a partir dos valores da resistência à compressão axial aos 7, 14, 21 e 28 dias, foi realizada uma análise estatística através de histograma e ANOVA (método do fator único). Percebe-se, portanto, que as misturas analisadas possuem resultados estatisticamente diferentes conforme o valor-P representativo inferior a 5%, o $F > F_{\text{crítico}}$ e pela dispersão dos dados circulados em vermelho (Figura 5). Quando há este comportamento, verifica-se que os dados são significativos a um nível de confiança de 95%, como pode ser visto no (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 7, 14, 21 e 28 dias de cura.

Tempo de análise	Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F-crítico
7 dias	Entre grupos	82,079557	5	16,41591	2,6582498	3,00E-02	2,353808958
14 dias		340,7330211		68,14660	7,1096072	2,26E-05	2,589189854
21 dias		159,0295567		31,80591	5,7705620	1,77E-04	2,848108839
28 dias		380,5367882		76,10736	39,3874620	1,54E-18	3,132919723

SQ: Soma dos quadrados;

gl: Grau de liberdade;

MQ: Média dos quadrados;

F: Teste F, valor calculado;

P: Nível de significância associado ao valor calculado F.

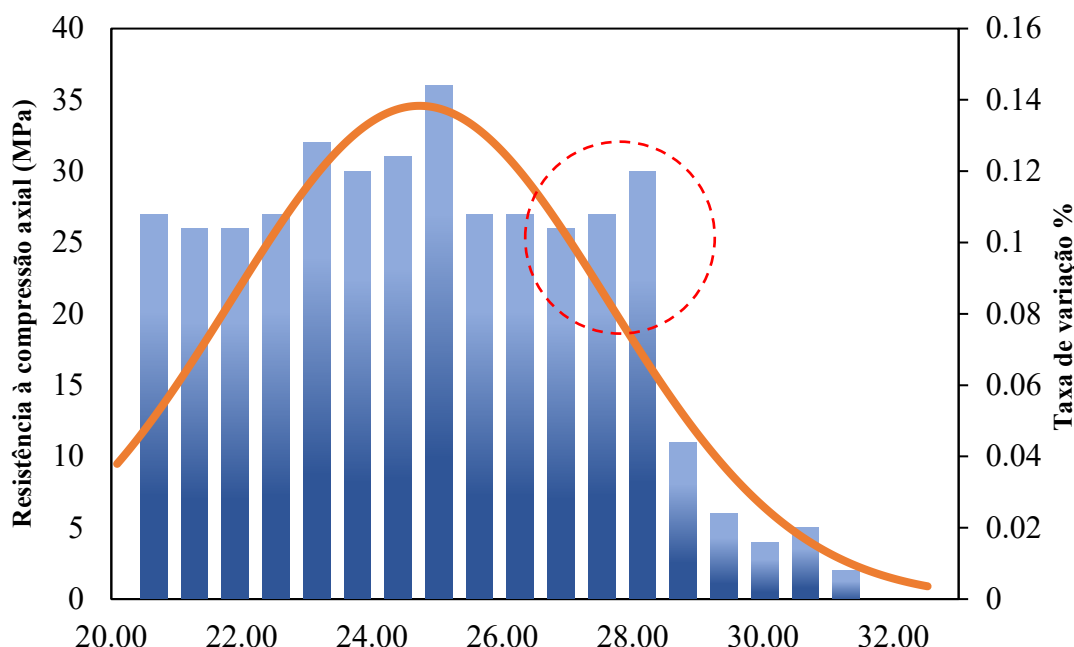


Figura 5. Análise da distribuição normal dos dados.

Foram realizadas algumas análises correspondentes aos dados obtidos no resultado de resistência à compressão simples que, por sua vez, possibilitaram compreender o comportamento de cada mistura. As amostras avaliadas passaram por um processo estatístico quantitativo (Tabela 4), onde percebeu-se que os compósitos de referência tiveram um desvio padrão médio de 1,699 e coeficiente de variação de 6,081 comparados às outras misturas. As misturas com teor de 50% de resíduos industriais apresentaram um desvio padrão de 0,804 e coeficiente de variação de 2,765, ou seja, 11% e 15% menor comparados aos compósitos referência, respectivamente.

Tabela 4. Análise estatística dos dados da resistência à compressão axial aos 28 dias de cura.

Dados	REF	50% de resíduos industriais	100% de resíduos industriais
Nº de amostras	30	30	30
Média	27,94	29,09	27,47
Desvio-padrão (médio)	0,906	0,804	0,768
Desvio-padrão (amostral)	1,156	1,073	1,019
Desvio-padrão (populacional)	1,156	1,027	0,975
Coefficiente de variação (%)	3,243	2,765	2,794
Erro padrão	0,143	0,127	0,121
Intervalo de confiança de 95%	28,30	29,41	27,77
	27,58	28,77	27,17
	0,358	0,318	0,302

3.5 Análise microestrutural

Para compreender o comportamento microestrutural dos compósitos cimentícios, utilizando diferentes percentuais de resíduos industriais, foi necessário realizar análises difratométricas. Todas as amostras foram analisadas após 28 dias através do ensaio de difração de Raios-X, com o

intuito de identificar as fases cristalinas presentes no material em processo de hidratação, bem como compreender as reações da portlandita nos estados de hidratação. Os padrões DRX podem ser vistos na (Figura 6 (a) e (b)).

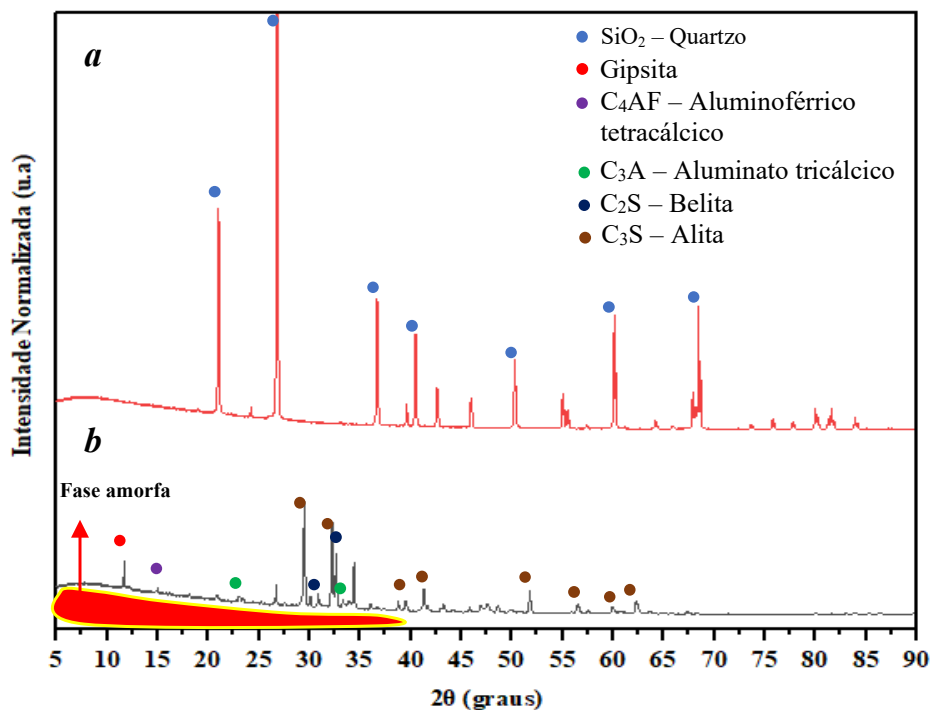


Figura 6. Difração de raios-X do agregado miúdo natural (a) cimento Portland/ aglomerante (b).

No que diz respeito ao comportamento dos materiais percussores, percebe-se que o agregado miúdo e o cimento Portland possuem estrutura cristalina com picos de intensidade bem definidos, como pode ser visto na ((Figura 6) (a)). A detecção dos picos do agregado miúdo está indicada nas posições 2θ : $21,2^\circ$, $26,8^\circ$, $36,7^\circ$, $40,4^\circ$, $50,3^\circ$, $60,0^\circ$ e $68,6^\circ$, onde referem-se às fases cristalinas do quartzo.

Quanto à alíquota do cimento Portland, pode-se perceber a formação dos picos de espectros de difração, onde foram identificadas algumas fases. As posições $2\theta = 29,5^\circ$ e $32,2^\circ$ são formadas pela decomposição da alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e na posição $2\theta = 62,3^\circ$ há a presença de silicato tricálcico – (C_3S). Além disso, nas posições $2\theta = 27,6^\circ$ e $32,8^\circ$ nota-se a fase cristalina composta pela belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e nas regiões $2\theta = 30,2^\circ$ e $31,1^\circ$ percebe-se a formação de silicato dicálcico – (C_2S). A formação do aluminato tricálcico – (C_3A) definido pela correlação química ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), pode ser visto nas posições $2\theta = 23,2^\circ$ e $33,4^\circ$. Nota-se que o aluminato férrico tetracálcico definido pela correlação química ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) abreviada por (C_4AF), pode ser visto na posição $2\theta = 14,7^\circ$ e a gipsita, por sua vez, pode ser notada na posição $2\theta = 11,8^\circ$.

Nesse contexto, é perceptível que o conteúdo de (C_3S), (C_2S), (C_3A), (C_4AF) e gipsita nas alíquotas de cimento Portland é bem definido. Todas as fases cristalinas identificadas no material, bem como a composição química presente na fase de hidratação do aglomerante, estão correlacionadas com os estudos realizados por Geng et al., (2018).

Todos os resultados, por sua vez, influenciam diretamente no comportamento do composto cimentício hidratado. Por serem materiais muito finos com área específica elevada, algumas partículas são frequentemente aglomeradas, as quais influenciam diretamente no comportamento físico-mecânico do material em estudo (concreto).

4. DISCUSSÕES

Pesquisas atuais visam avaliar a utilização de pós de mármore e pó de brita granítica como material alternativo que visa a diminuição dos impactos ambientais. Em termos de desempenho mecânico dos compósitos cimentícios modificados com pó de mármore, Arshad et al., (2014) concluíram que a substituição de 15% de agregado miúdo por resíduos de pó de mármore na presença de aditivos plastificantes, evidenciou uma resistência máxima à compressão axial similar à mistura de referência, após 28 dias de cura.

Shukla, Gupta e Gupta (2020) ao produzirem compósitos cimentícios contendo pó de mármore na proporção de 100%, observou-se valores de resistência à compressão axial média aos 28 dias de, aproximadamente, 40 MPa, sendo este 6,5% maior quando comparado com as misturas de referência. Da mesma forma, Barros e Fucale (2016) verificaram a possibilidade do uso da substituição total do agregado natural pelo reciclado e concluíram que o concreto foi capaz de suportar esforços de compressão 22% superiores quando comparados à mistura de referência.

Estudos realizados por Aliabdo et al., (2014) evidenciaram que a utilização da relação água/cimento (a/c) de 0,40, possibilitou um aumento significativo na resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios contendo resíduos industriais em sua matriz. Além disso, observaram que a compactação mecânica do concreto incide no preenchimento dos vazios.

Ali e Hashmi (2014), avaliaram o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios utilizando diferentes percentuais de pó de mármore e pó de pedra individualmente. Os autores perceberam que a utilização de 20% de pó de pedra melhora as propriedades mecânicas dos materiais à base de cimento em, aproximadamente, 17% durante 7 dias e 16% aos 28 dias de análise.

Estudos realizados por Hebhouh et al., (2011) relataram um aumento na resistência à compressão axial utilizando 75% de agregados reciclados. Além disso, os autores realizaram uma análise comparativa comportamental, onde perceberam que a utilização de 100% de agregados reciclados incide na perda de resistência à compressão axial determinado pelo preenchimento dos microporos na matriz cimentícia, melhorando as propriedades na zona de transição. Todas as análises corroboraram com os resultados obtidos nesse estudo.

Rodrigues, Brito e Sardinha (2015), avaliaram o comportamento dos compósitos cimentícios contendo materiais sólidos industriais, onde perceberam que a utilização de plastificantes melhoram a resistência à compressão axial e a trabalhabilidade. Além disso, faz-se necessário a utilização adequada dos resíduos industriais, pois os mesmos quando utilizados de forma incorreta, podem acarretar na decomposição do silicato dicálcico (C_2S) e silicato tricálcico (C_3S), constituintes estes, responsáveis pelo aumento da resistência à compressão dos compósitos à base de cimento.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi analisado o comportamento dos compósitos cimentícios, mais especificamente o concreto quanto à utilização de agregados industriais compostos por pó de mármore e pó de brita granítica em substituição parcial ao agregado miúdo natural, como alternativa para minimizar os impactos ambientais. As principais conclusões estão descritas a seguir:

- Os compósitos cimentícios (concreto) contendo 50% de resíduos industriais resultaram em um aumento na resistência à compressão axial de 29,09 MPa, ou seja, 4% maior quando comparados às misturas de referência;
- A utilização de plastificantes melhoram os comportamentos dos materiais cimentícios, principalmente com relações água/cimento baixas. Além disso, as misturas contendo 100% de agregados reciclados, tiveram um abatimento de tronco de cone menor, mesmo contendo plastificante em sua composição;

- Os resultados das misturas de referência e com 100% de agregados reciclados possuem comportamentos semelhantes quando analisados aos 28 dias, onde os valores obtidos foram de 27,94 MPa e 27,47 MPa, respectivamente.
- A utilização de componentes com maiores teores de materiais pulverulentos pode afetar a trabalhabilidade devido à elevada superfície específica. Por outro lado, a utilização adequada dos percentuais pode promover os preenchimentos dos vazios no interior da matriz cimentícia, bem como contribuir com o processo de coesão e melhoria das propriedades mecânicas dos materiais à base de cimento;
- Foi possível notar que todas as misturas possuem correlação amostral significativa, ou seja, variam em torno de 0,900 e 0,920.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é de grande relevância para a comunidade científica/acadêmica e não seria possível sem a colaboração de todos os participantes. Agradecemos também à Faculdade de Integração do Sertão – FIS, Escola Politécnica de Pernambuco – POLI/UPE, à Universidade Católica de Pernambuco e, sobretudo, às agências de fomento à pesquisa do CNPq “*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*” e da CAPES “*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*”.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003), *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT – (2015), *NBR 5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- ABNT – (2018), *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014), *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009), *NBR 7211: Agregados para concreto Especificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1982), *NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015), *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1987), *NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2004), *NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., Auda, E. M. (2014), *Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete*. Construction and Building Materials. 50(1):28-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>

- Ali, M. M., Hashmi, S. M. (2014), An Experimental investigation on strengths characteristics of concrete with the partial replacement of Cement by Marble Powder dust and Sand by Stone dust. *IJSRD – International Journal for Scientific Research & Development*. 2(7):360-368.
- Andrade, J. J. O., Possan, E., Squiavon, J. Z., Ortolan, T. L. P. (2018), *Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste*. *Construction and Building Materials*. 161(1):70-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089>
- Arshad, A., Shahid, I., Anwar, U. H. C., Baig, M. N., Khan, S., Shakir, K. (2014), *The Wastes Utility in Concrete*. *International Journal of Environmental Research*. 8(4):1-20. <http://dx.doi.org/10.22059/ijer.2014.825>
- Azevedo, A. R. G., Vieira, C. M. F., Ferreira, W. M., Faria, K. C. P., Pedroti, L. G., Mendes, B. C. (2020), *Potential use of ceramic waste as precursor in the geopolymerization reaction for the production of ceramic roof tiles*. *Journal of Building Engineering*, 29(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101156>
- Barros, E., Fucale, S. (2016), *O uso de resíduos da construção civil como agregados na produção de concreto*. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*. 2(1). <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i1.343>
- Brandão, R., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., Melo, A. C. S., Macêdo, A. N. (2021), *Reverse supply chain conceptual model for construction and demolition waste*. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 39(11):1341-1355. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x21998730>
- Cipriano, P. B., Galdino, T. S. G., Sá, C. S., Ferraz, A. V. (2021), *Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado*. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 26(3). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13026>
- Geng, G., Li, J., Zhou, Y., Liu, L., Yan, J., Kunz, M., Monteiro, P. J. M. (2018), *A high-pressure X-ray diffraction study of the crystalline phases in calcium aluminate cement paste*. *Cement and Concrete Research*. 108(1):38-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.004>
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E. (2011), *Use of waste marble aggregates in concrete*. *Construction and Building Materials*. 25(3):1167-1171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Kashani, A., Ngo, T. D., Mendis, P., Black, K. R., Hajimohammadi, A. (2017), *A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete*. *Journal of Cleaner Production*. 17(3):1-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>
- Klepa, R. B., Medeiros, M. F., Franco, M. A. C., Tamberg, E. T., Farias, T. H. B., Paschoalin Filho, J. A., Berssaneti, F. T., Santana, J. C. C. (2019), *Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control*. *Journal of Cleaner Production*. 209(1):250-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.225>
- Mechtcherine, V., Michel, A., Liebscher, M., Schneider, K., Großmann, C. (2020), *Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: material and automation perspectives*. *Automation in Construction*. 110(1):1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103002>
- Meena, R. V., Chouhan, H. S., Jain, J. K., Satankar, R. K. (2021), *Construction and Demolition Waste as an Alternative of Rigid Pavement Material: a review*. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*. 795(1). <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/795/1/012019>
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2020), *Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: a review*. *Resources, Conservation and Recycling*. 155(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>

- Nascimento, C. F. G., Monteiro, E. C. B., Silva e Souza, M. G., Teixeira, I. A. R., Vale, L. J. S., Valões, D. C. P., Cavalcanti, L. R., Figueira, A. M. A., Pedrosa, P. G. V. (2020), *Viabilidade da substituição parcial do resíduo de construção civil pelo agregado miúdo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto*. Brazilian Journal of Development. 6(8):62073-62081. <http://doi.org/10.34117/bjdv6n8-581>
- Nascimento, C. F. G., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Silva, F. G. A., Neves, D. C. M., Pedrosa, P. G. V., Valões, D. C. P., Monteiro, E. C. B. (2021), *Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto armado frente a corrosão de armadura desencadeada por carbonatação acelerada*. Conjecturas. 21(4):569-599. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-237-801>
- Nguyen, Q. D., Castel, A. (2020), *Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete*. Cement And Concrete Research. 132(1):1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106051>
- Oliveira, P. S., Antunes, M. L. P., Cruz, N. C., Rangel, E.C., Azevedo, A. R. G., Durrant, S. F. (2020), *Use of waste collected from wind turbine blade production as an eco-friendly ingredient in mortars for civil construction*. Journal of Cleaner Production. 274(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122948>
- Paiva, F. F. G., Tamashiro, J. R., Silva, L. H. P., Kinoshita, A. (2021), *Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review*. Construction and Building Materials. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122833>
- Rodrigues, R., Brito, J., Sardinha, M. (2015), *Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge*. Construction and Building Materials. 77(1):349-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.104>
- Shukla, A., Gupta, N., Gupta, A. (2020), *Development of green concrete using waste marble dust*. Materials Today: Proceedings. 26(1):2590-2594. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.548>
- Silva, J. A., Piva, J. H., Wanderlind, A., Savi, A. E., Antunes, E. G. P. (2021), *Análise das características físicas e propriedades mecânicas de argamassa com inserção de resíduos de madeira*. Matéria (Rio de Janeiro). 26(3). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13008>
- Thapa, V., Waldmann, D. (2021), *Binary blended cement pastes and concrete using gravel wash mud (GWM) powders*. Construction and Building Materials. 302(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124225>
- Souza, F. C. (2019), *Avaliação de propriedades mecânicas e físicas do concreto com a adição de pó de brita*. Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville.
- Varadharajan, S., Jaiswal, A., Verma, S. (2020), *Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk ash and marble dust in concrete*. Structures. 28(1):389-406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.005>
- Zhen, Y., Liu, B. (2021), *Experimental Study on the Performance of Improved Collapsible Loess Mixture with Concrete Crushed Gravel*. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science. 781(2). <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/781/2/022068>

Realcalinização eletroquímica de corpos de prova de concreto carbonatado aplicado sob os critérios de três normas

J. A. Paat Estrella^{1*}, J. A. Miam Cuevas², E. E. Maldonado Bandala³,

T. Pérez López⁴, D. Nieves Mendoza³

*Autor de Contacto: josapaae@uacam.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.619>

Recepção: 15/06/2022 | Aceitação: 30/08/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

O efeito da realcalinização eletroquímica foi avaliado pela aplicação das normas UNE-EN-1504, NACE-SP0107 2007 e NMX-C-553-ONNCCE-2018, em amostras de concreto armado previamente carbonatadas. Com o acompanhamento do grau de realcalinização, através de medidas de pH e potencial de meia célula aos 7, 14, 21 e 28 dias, observa-se a recuperação do pH em todos os casos, obtendo valores característicos de potencial de meia célula em cada aplicação de corrente, o que confirma a polarização do aço, modificando a condição termodinâmica da interface concreto-aço e provocando alterações químicas na pasta de concreto. Com a norma NMX-C-553-ONNCCE-2018 o aço foi polarizado sem atingir a região de sobreproteção, evitando o risco de produção de hidrogênio e fragilidade no aço..

Palavras-chave: realcalinização eletroquímica; pH; potencial de meia célula; amperagem.

Citar como: Paat Estrella, J. A., Miam Cuevas, J. A., Maldonado Bandala, E. E., Pérez López, T., Nieves Mendoza, D. (2022), “Realcalinização eletroquímica de corpos de prova de concreto carbonatado aplicado sob os critérios de três normas”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 347 – 361, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.619>

¹ Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana, campus Xalapa, Veracruz, México.

² Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, campus Xalapa, Veracruz, México.

⁴ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

Contribuição de cada autor

Conceituação, Pérez, T. (50%), Paat, J. A. (50%); Desenvolvimento experimental, Paat, J. A. (70%), Miam, J. A. (30%); Methodology, Maldonado, E. E. (40%), Nieves, D. (40%), Paat, J. A. (20%); Research, Paat, J.A. (100%); Organização e Análise de resultados, Pérez, T. (50%), Nieves, D. (50%); Redação, Paat, J. A. (60%), Pérez, T. (40%); Revisão e edição, Pérez, T. (60%), Nieves, D. (40%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Electrochemical realkalinization applied to carbonated concrete samples under the criteria of three standards

ABSTRACT

The effect of electrochemical realkalinization was evaluated by applying the standards UNE-EN-1504, NACE-SP0107-2007 and NMX-C-553-ONNCCE-2018, on previously carbonated reinforced concrete samples. With the monitoring of the degree of realkalinization, through pH and half-cell potential measurements at 7, 14, 21 and 28 days, pH recovery is observed in all cases, obtaining characteristic half-cell potential values in each current application, which confirms the polarization of the steel modifying the thermodynamic condition of the concrete-steel interface and causing chemical changes in the concrete paste. With the NMX-C-553-ONNCCE-2018 standard the steel was polarized without reaching the overprotection region, avoiding the risk of producing hydrogen and brittleness in the steel.

Palabras clave: electrochemical realkalinization; pH; half-cell potential; current intensity.

Realcalinización electroquímica aplicada a muestras de concreto carbonatadas bajo criterios de tres normatividades

RESUMEN

Fue evaluado el efecto de realcalinización electroquímica aplicando las normas UNE-EN-1504, NACE-SP0107 2007 y NMX-C-553-ONNCCE-2018, en muestras de concreto reforzado previamente carbonatadas. Con el seguimiento del grado de realcalinización, mediante mediciones de pH y potencial de media celda a 7, 14, 21 y 28 días, se observa la recuperación del pH en todos los casos, obteniendo valores de potencial de media celda característicos en cada aplicación de corriente, que confirma la polarización del acero modificando la condición termodinámica de la intercara concreto-acero y ocasionando cambios químicos en la pasta de concreto. Con la norma NMX-C-553-ONNCCE-2018 se polarizó el acero sin llegar a la región de sobreprotección, evitando el riesgo de producir hidrógeno y fragilidad en el acero

Palabras clave: realcalinización electroquímica; pH; potencial de media celda; intensidad de corriente.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é considerada como sua capacidade de manter as condições físicas e químicas inalteradas durante sua vida útil quando submetidas à degradação do material, por isso o projeto estrutural de uma edificação de concreto armado deve estipular as medidas adequadas para que ela atinja a vida útil estabelecida no projeto, levando em consideração as condições ambientais e climáticas e o tipo de edificação a ser construída.

A deterioração de infraestruturas como pontes, oleodutos, tanques, edifícios, canais, portos, armazéns, monumentos históricos, aeroportos, ferrovias, etc. afeta a sociedade porque essas estruturas ficam inutilizadas antes de atingir o fim de sua vida útil estabelecida. Portanto, dentro das prioridades no México, estão a segurança das pessoas, os imóveis e a proteção do meio ambiente.

Técnicas como Realcalinização Eletroquímica (RAE) e Remoção Eletroquímica de Cloretos (ECR) têm se mostrado promissoras de acordo com experiências obtidas tanto em laboratório quanto *in situ* (Weichung, Y., Jiang, J.C., 2005).

A realcalinização eletroquímica tem sido utilizada em inúmeras ocasiões em aplicações práticas e laboratoriais, no entanto, atualmente não há consenso sobre quais são os parâmetros relacionados à estrutura e à técnica que permitem avaliar sua eficácia ao longo do tempo (Gonzalez, F., 2010). Embora esta técnica tenha demonstrado sua eficácia em estruturas reais, ainda não pode ser considerada uma técnica de rotina devido à falta de informações detalhadas sobre alguns aspectos como os efeitos secundários que causa e que a longo prazo podem afetar a durabilidade do concreto. (Mietz, J., 1998; Rincón, T., 1994).

A aplicação dessas técnicas eletroquímicas (TE) como métodos não convencionais de intervenção e manutenção têm despertado grande interesse no campo da Engenharia Civil. Em alguns dos países industrializados existem experiências de implementação das técnicas, no entanto, o número de trabalhos relatados explicando as condições de aplicação não é abundante (Rincón, T. 1994; Helene, P. 1994; Pollet, V. 2000; Bize B. 2001; Raharinaivo 1992; Chatterji, S. 1994; Fajardo, G., et al. 2006).

Como método de reabilitação ou como tratamento preventivo, o método de realcalinização tem sido utilizado para recuperar a alcalinidade do concreto próximo à região da armadura (Mietz, J., 1998). A vantagem deste método é que quando o tratamento é finalizado, o sistema pode ser desmontado e a estrutura de concreto pode continuar sua função sem grandes intervenções destrutivas como ocorre no tratamento convencional de reparo localizado (Redaelli, E., and Bertolini, L. 2011).

Estudos sobre o tratamento de realcalinização que se concentraram em entender as características do fenômeno, como os mecanismos de transporte envolvidos (Aguirre, A., e Gutiérrez, R., 2018; Castellote, M., et al., 2003; González, F., 2010), a eficiência de repassivação do reforço (Redaelli, E., e Bertolini, L. 2011; Yeih, W., e Chang, J., 2005), a eficiência de diferentes eletrólitos na realcalinização (Mietz, J. 1995), os efeitos nas propriedades do concreto e os efeitos secundários (González, F., 2010; Ribeiro, P., et al., 2013; Tong Y., et al., 2012), foram realizados durante os últimos anos.

As aplicações *in situ* foram introduzidas no final da década de 1980 e um número significativo de estruturas foram tratadas com esta técnica. Alguns documentos relatam essas experiências e mostram a capacidade da técnica de recuperar os níveis de pH protetores. Esses estudos também mostram que, mesmo após alguns anos, a alcalinidade permanece em níveis elevados, o que seria suficiente para proteger a armadura (Yeih, W., Chang, J., 2005). Alguns desses avanços foram incluídos apenas em regulamentações e normas locais e regionais.

Devido ao fato de que a aplicação de uma intensidade de corrente elétrica induz a polarização da interface concreto-aço com variação no valor do potencial de meia célula, bem como alterações na

composição química da pasta de concreto, refletidas principalmente pelo pH, considerou-se conveniente comparar 3 condições de realcalinização estabelecidas nas normas UNE EN 1504, NACE SP0107 2007 e NMX-C-553-ONNCCE-2018, nas quais a configuração experimental é praticamente a mesma, onde a variação é o tempo de aplicação, sendo 7 dias para a NACE, 14 para a UNE e 28 para o NMX; e a intensidade da corrente aplicada, sendo 4 A/cm² no primeiro caso, 2 A/m² no segundo e 1 A/m² no terceiro, considerando a superfície da haste de aço.

É de se esperar que a polarização mais intensa tenha sido alcançada para as condições NACE, seguida pela UNE (EURO) e finalmente a menor para a NMX. Da mesma forma, a taxa de realcalinização seria esperada na mesma ordem. No entanto, optou-se por levar a polarização até 28 dias em todos os casos, com a interrupção para medição de recuperação de carbonatação e potencial de meia célula aos 7, 14, 21 e 28 dias, para observar a capacidade de recuperação da alcalinidade da interface concreto-aço. Ao mesmo tempo, registrar a faixa de valores de potencial de meia célula que excedem os valores de superproteção que atingem a zona de fragilização por hidrogênio, um fenômeno muito nocivo, especialmente para aço pós-tensionado e pré-tensionado. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da realcalinização eletroquímica aplicando as normas UNE-EN-1504, NACE-SP0107 2007 e NMX-C-553-ONNCCE-2018, em amostras de concreto armado parcialmente carbonatadas de forma prévia.

2. PROCEDIMENTO

2.1 Materiais usados

Os materiais utilizados para a elaboração dos corpos de prova de concreto atenderam às normas vigentes.

Os agregados foram selecionados de acordo com a norma NMX-C-111-ONNCCE-2018. Foi utilizada areia do mar lavada como agregado miúdo e brita com tamanho máximo de 19 mm como agregado graúdo. Esses materiais eram característicos da região sudeste do México, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos componentes utilizados nos traços.

Ensaio	agregado graúdo	agregado miúdo	Cimento
PSSS (kg/m ³)	1241	1335	1400
PVHA (kg/m ³)	1417	1514	
Densidade ou massa específica (gr/cm ³)	2,26	2,56	3.2
% Absorção	2,5	2,56	- - -
TMNA (mm)	12,5	2,5	- - -

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o Cimento Portland Composto de Resistência Rápida (CPC 30R), com massa específica de 3200 kg/m³ (NMX-C-414-ONNCCE-2017).

Este importante elemento foi abastecido com água purificada comercial, a fim de evitar a contaminação da amostra.

2.2 Projeto e preparação das amostras

Foram confeccionados 66 corpos de prova de concreto armado com aço A615 (ASTM), 0,95 cm (3/8") e 18 sem aço (Figura 1), com relação a/c de 0,6, a fim de obter corpos de prova de concreto com alta porosidade a ser capaz de controlar a difusão de íons e CO₂.

Nesta primeira etapa, as hastes foram cortadas no comprimento de 50 cm, posteriormente foram limpas com solução de HCl 1:1, e 17,5 cm de cada extremidade foram cobertos com fita isolante, deixando uma área central de trabalho de 15 cm, como é mostrado na Figura 1(a).

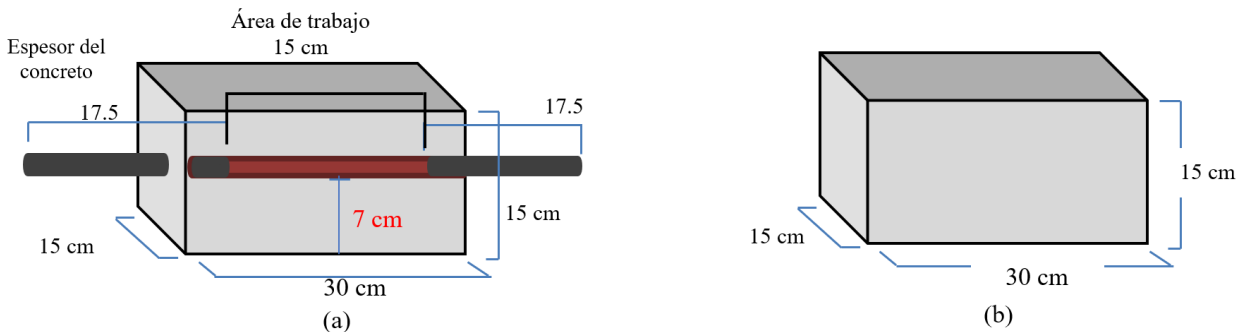


Figura 1. Características das amostras confeccionadas, (a) Com haste de 50 cm, sendo 20 cm descobertos como área de trabalho; (b) Sem haste.

O traço foi desenvolvido de acordo com as disposições do ACI (American Concrete Institute) 211.1 para uma resistência média à compressão de 250 kg/cm².

Para melhorar a plasticidade da mistura, utilizou-se 35ml/l de um aditivo fluidificador redutor de água. As quantidades dos materiais para o traço são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Massa do material por metro cúbico de mistura de concreto.

Materiais	Quantidade utilizada (kg)
Água	115,82
Cimento	288,43
agregado graúdo	500,15
agregado miúdo	511,51

Após 24 horas, as amostras foram retiradas do molde e submetidas à cura por imersão em solução saturada de Ca(OH)₂ por 28 dias. Após este tempo, as amostras atingiram uma resistência média à compressão de 204 kg/cm².

As amostras foram divididas em três séries (I, II e III), às quais foram aplicadas intensidades de corrente em relação à área de aço de acordo com o disposto na norma NMX-C-553-ONNCCE-2018 (1 A /m²), UNE EN 1504 (2 A/m²) e NACE SP0107 2007 (4 A/m²), respectivamente.

2.3 Ensaio Acelerado

Para obter maior carbonatação em menos tempo, os corpos de prova foram colocados em uma câmara de carbonatação acelerada, uma vez que a carbonatação em condições naturais é um fenômeno lento do ponto de vista técnico. Durante os ensaios acelerados, as amostras de concreto foram submetidas a um ambiente com concentração de CO₂ de 4 ± 0,5%, de acordo com os ensaios realizados por Turcry, Oksri-Nelfia, Younsi, & Ait-Mok em 2014, e com uma umidade relativa de 60 ± 5%. Foi proposto que, com ensaios acelerados em concentrações de CO₂ de 4%, a mesma profundidade de carbonatação é produzida em uma semana que com concentrações normais (0,03%) em um ano (Moreno, M., *et al*, 2004).

2.4 Realcalinização Eletroquímica (RAE)

A realcalinização eletroquímica é uma técnica utilizada para recuperar o pH alcalino do concreto, permitindo a repassivação da armadura. O funcionamento do RAE é muito semelhante à proteção catódica de corrente impressa, pois uma corrente elétrica contínua é aplicada a partir do ânodo, fechando o circuito usando o aço da armadura como cátodo. Essa técnica foi realizada com base nos critérios estabelecidos nas normas NACE SP0107-2007, UNE-EN-1504 e NMX-C-553-ONNCCE-2018, considerando as especificações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Condições consideradas.

Parâmetros	padrão mexicano NMX	padrão europeu EN	padrão americano NACE
densidade atual	1A / m ² _	2A / m ² _	4A / m ² _
alcance de voltagem	15 - 30V DC		
sistema anódico	malha de aço galvanizado		
Eletrólito	Carbonato de sódio		
Tempo	7 - 28 dias		
pH	profundidade de realcalinização		

Após a carbonatação acelerada a que as amostras de concreto foram expostas, as mesmas foram submetidas ao processo de realcalinização eletroquímica, sendo necessário a implantação de dispositivos de realcalinização, conforme descrito a seguir.

Foram selecionadas 27 amostras para submissão ao RAE, a pintura das bases foi reforçada para que o carbonato de sódio penetrasse apenas pelas laterais da viga. Posteriormente, cada uma das amostras foi coberta com uma malha de aço galvanizado, que serviu de ânodo durante o RAE, foram dispostas verticalmente em um recipiente plástico com capacidade suficiente, ao qual foi feito um furo na base, para deixar descoberto um lado da haste e não ser afetado pelo eletrólito de imersão (carbonato de sódio 1M) (ver Figura 2).



Figura 2. Configuração experimental usada para realcalinização eletroquímica.

2.4.1 Medição da profundidade de realcalinização e intensidade da corrente de realcalinização

Foi feita uma ligação em paralelo em 3 correntes diferentes: 1 A/m², 2 A/m² e 4 A/m², fazendo as ligações em triplicado. Para realizar esta conexão, foi necessário projetar um dispositivo de distribuição elétrica que mantivesse um fluxo elétrico constante conectado a duas fontes de energia

para atingir a tensão necessária.

A realcalinização eletroquímica foi realizada durante 28 dias, sendo as amostras divididas em três séries (série I, série II e série III), de 9 amostras cada, com o objetivo de comparar os possíveis efeitos colaterais que poderiam ocorrer.

Durante este tempo, o pH na interface concreto-aço e da pasta de concreto foi monitorado pelo método do indicador. Essas medições foram feitas a cada sete dias a partir do dia do início do EIR até completar 28 dias, conforme mencionado por vários autores (Ton, Y., *et al* 2012, Yeih, W., e Chang, J., 2005). A extração dos testemunhos e das amostras de pó foi realizada na haste descoberta de 15 cm, utilizando um cálice de 1,5” de diâmetro e 7 cm de comprimento acoplada a uma furadeira. (Figura 3). Durante a extração, a profundidade e o pH de cada feixe exposto à realcalinização foram determinados pelo método úmido, utilizando-se fenolftaleína (variação entre 8,2 -10) e timolftaleína (variação entre 9 -10,5) como indicadores. A medição foi feita obtendo-se uma média da frente de carbonatação da superfície da amostra. Adicionalmente, o pH foi determinado na profundidade da superfície da haste em amostras extraídas das amostras, por meio do método potenciométrico, que determina o nível de alcalinidade do concreto por meio de uma extração com água destilada estabelecida na ASTM D4262 -05. (2018) *Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces*.



Figura 3. Extração de testemunhos e amostras de pó.

2.4.2 Potencial de meia célula (Emc)

O monitoramento da condição termodinâmica da superfície da armadura é baseado principalmente em medições do potencial de meia célula, que está relacionado ao estado ativo ou passivo da armadura. A medida consistiu em determinar a diferença de potencial elétrico entre a armadura e um eletrodo de referência (Cu/CuSO₄) colocado na superfície do concreto (American Society for Ensaio e Materiais, 2016), ASTM C-876-15, NMX-C-495-ONNCCE-2015.

3. RESULTADOS

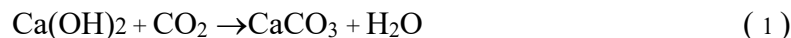
A seguir, são apresentados os resultados experimentais da realcalinização eletroquímica de corpos de prova reforçados com profundidade de carbonatação de 6,7 cm. Resultados de pH e coeficiente de carbonatação são apresentados. No RAE, o comportamento da Emc da armadura de aço (catodo) é mostrado para 28 dias, com intervalos de medição de 24 horas. Essas medições foram feitas sem interromper a corrente elétrica.

3.1 Carbonatação

3.1.1 Ensaio de câmara de carbonatação acelerada (ACC)

Este processo de degradação química ou deterioração do concreto por CO₂ foi realizado durante um período de seis meses. A Figura 4 mostra a medição do progresso da carbonatação em relação

ao tempo, utilizando os indicadores ácido-base de acordo com a norma NMX-C-515-ONNCCE-2016. Uma tendência linear pode ser observada no progresso da carbonatação ao longo do tempo de exposição, pois há uma grande diferença entre a taxa de difusão do CO₂ no ar e na água, sendo esta última aproximadamente 104 vezes menor do que no ar, que nas condições de umidade relativa do CCA (60%), os poros do concreto são parcialmente preenchidos, o que permite que o CO₂ se difunda com facilidade. Em contraste, se os poros estiverem cheios de água (Figura 5b), dificilmente haverá carbonatação, porque há pouca difusão de CO₂ na água (Del Valle *et al* 2001). A pasta de cimento hidratada com pH de 11,5 a 12,5 adquiriu coloração vermelho-violeta; no entanto, quando submetido à ação do CO₂, foi ocasionada uma diminuição do pH até atingir valores da ordem de 8 devido à neutralização, em maior ou menor grau, dos íons hidroxila, produzindo, entre outras, a reação (1):



Em virtude do qual se forma o carbonato de cálcio, incorporando CO₂ do meio.

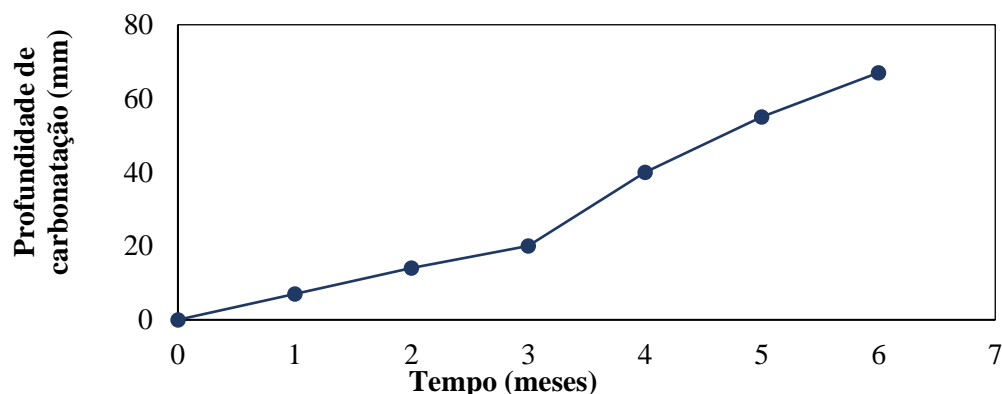


Figura 4. Profundidade de carbonatação versus tempo de exposição em CCA .

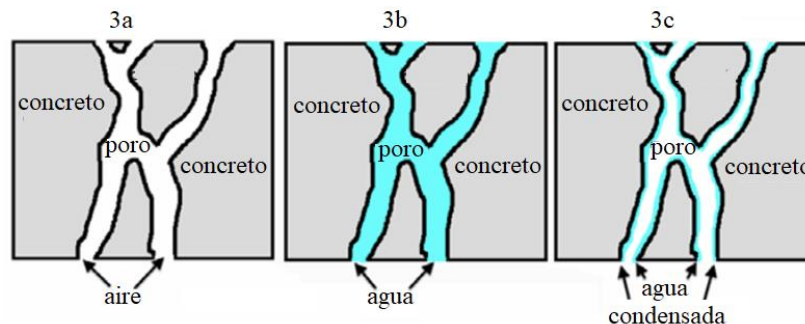


Figura 5. Preenchimento dos poros. a) Poro seco, b) Poro saturado de água, c) Poro parcialmente preenchido. Imagens modificadas de Del Valle *et al* 2001.

3.1.2 Medição de pH na interface concreto-aço.

O objetivo de carbonatar os corpos de prova antes do processo RAE era baixar o pH e poder recuperá-lo por meio de realcalinização para observar os efeitos causados por essa recuperação. O valor médio de pH obtido foi de 8 com desvio padrão de $\pm 0,8$, que coincidiu com o estabelecido por Aguirre, A.M, *et al* (2016) e Ribeiro, PHLC, *et al* (2013) que determinaram que o pH da solução porosa nas zonas praticamente carbonatadas variaram entre 11,5 e valores abaixo de 9 (Figura 4). Isso indica que a partir do terceiro mês de carbonatação, as amostras de concreto já estavam carbonatadas, porém, para obter maior recuperação de pH, optou-se por obter valores de pH abaixo de 9.

A Figura 6 mostra os gráficos de pH ao nível da armadura e E_{corr}, mostrando que durante o processo de carbonatação o pH diminuiu gradualmente, de um pH de aproximadamente 13 para um pH de 9 nas proximidades da haste, coincidindo com o valor do potencial de corrosão que deslocou seu valor inicial de -120 mV para aproximadamente -700 mV, o que de acordo com a norma ASTM C-876-15, significa que esses valores estão abaixo do valor estabelecido de -350 mV com 90% de risco de corrosão. Raja e Tetsuya (2010), relatam um seguimento semelhante, no qual a E_{corr} diminuiu com o avanço da carbonatação, partindo de -180 a -475 mV vs ECS. Eles propõem que a profundidade crítica de carbonatação seja de 80% do cobrimento total do concreto.

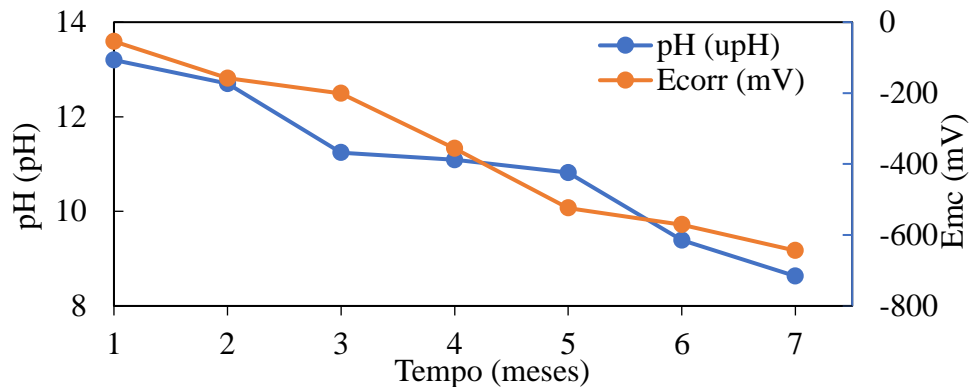


Figura 6. Monitoramento de pH e E_c durante a carbonatação.

3.2.1 Realcalinização Eletroquímica

A técnica de realcalinização eletroquímica é um método alternativo baseado na aplicação de um campo elétrico a um sistema formado por aço-concreto dentro de uma solução alcalina que funciona como eletrólito. É considerada uma técnica temporária porque é aplicada de alguns dias a algumas semanas (Gonzalez, F., *et al.* 2011).

Para iniciar o processo de realcalinização foram selecionados corpos de prova cujos potenciais de corrosão estavam entre -350 mV e -650 mV, com profundidade média de carbonatação de 6,5 cm e pH abaixo de 9, o que significou uma recuperação da alcalinidade do concreto a partir da superfície de contato entre o eletrólito e a amostra.

Os resultados obtidos do RAE nos corpos de prova de concreto nas três intensidades de corrente utilizadas são apresentados a seguir.

3.2.1.1 Amostras reforçadas realcalinizadas a 1 A/m² de acordo com NMX-C-553-ONNCCE-2018

Durante este tratamento, utilizou-se a técnica do indicador colorimétrico para acompanhar o andamento da realcalinização do concreto em cada estrutura. Essa evolução foi monitorada a cada 7 dias durante os 28 dias de aplicação da corrente.

Nos primeiros 7, 14 e 21 dias de realcalinização (Figuras 7, 8 e 9), as amostras apresentaram uma leve mudança de cor para rosa e violeta nos primeiros três centímetros de profundidade, devido aos indicadores de fenolftaleína (fica rosa em pH 8,2 com intensificação da cor em > pH) e timolftaleína (torna-se violeta em pH 9,2 com intensificação da cor em > pH), respectivamente. Aos 28 dias de realcalinização (Figura 10), obteve-se um aumento superior a 11, atingindo o objetivo de realcalinização eletroquímica. A partir do dia 21, tanto o EIR interno quanto o externo são observados sobrepostos ao longo dos 7 cm de profundidade.

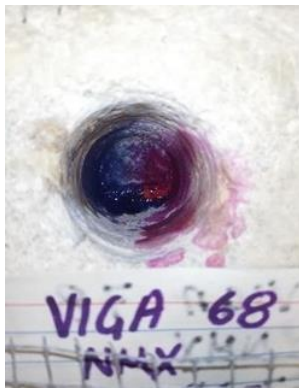


Figura 7. 7 dias.



Figura 8. 14 dias



Figura 9. 21 dias.



Figura 10. 28 dias.

3.2.1.2 Amostras armadas realcalinizadas a 2 A/m² de acordo com a norma UNE-EN-1504

Na figura 11, observa-se uma amostra após 7 dias de realcalinização, em que a mudança de cor pode ser observada ao final dos 7 cm de profundidade, porém, após 14 dias desse processo, a cor desbota, intensificando-se, permanecendo constante nos dias 21 (Figura 12) e 28 (Figura 13), que, de acordo com os resultados obtidos a partir da determinação do pH pelo método do eletrodo, atinge valores próximos a 12.

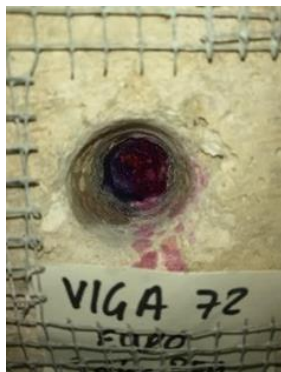


Figura 11. 7 dias.



Figura 12. 14 dias.



Figura 13. 21 dias.



Figura 14. 28 dias.

3.2.1.3 Amostras reforçadas realcalinizadas a 4 A/m² de acordo com a norma NACE SP0107-2007

Por fim, as amostras que foram submetidas a uma intensidade de corrente de 4 A/m² apresentaram um aumento de coloração a partir dos primeiros 7 dias do processo de realcalinização de forma homogênea ao longo dos 7 centímetros de espessura do concreto (Figura 15), esta se intensificando ao longo do tempo e permanecendo constante até 28 dias após a realcalinização (Figuras 16, 17 e 18), atingindo valores de pH superiores a 11 (ver Figura 19).



Figura 15. 7 dias.



Figura 16. 14 dias.

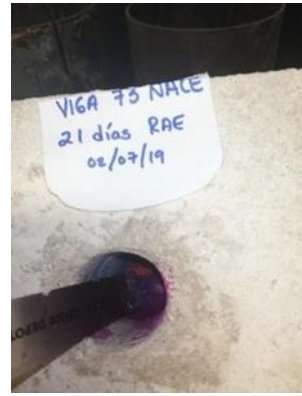


Figura 17. 21 dias.



Figura 18. 28 dias.

No caso destas amostras, observa-se uma melhora na propagação de ambas as alcalinidades, uma produzida pela reação catódica e outra devido à penetração do eletrólito alcalino, permitindo que os efeitos do tratamento se estendam por toda a profundidade do concreto. Isso coincide com o publicado por Mietz (1995) e por Redaelli & Bertolini (2011).

De acordo com a intensidade da cor, e comparando-os com os padrões EURO e NACE, as amostras sob os critérios da NMX-C-553-ONNCCE-2018 correspondentes a 1 A/m^2 não apresentaram aumento considerável de pH durante os primeiros 7 dias de realcalinização (ver Figura 19), o que, segundo Aguirre-Guerrero, A., e Mejía de Gutiérrez, R., 2018, a torna menos eficaz nos primeiros 7 dias. No entanto, independentemente das normas utilizadas, todas as amostras aos 28 dias de realcalinização obtiveram pH superior a 11 (ver Figura 19).

Como pode ser visto nas Figuras 6-9, a coloração dos indicadores ocorre com maior intensidade em duas direções, o que representa uma recuperação do pH da mesma forma, 1) da armadura para a superfície interna (RAE interno), devido à produção de alcalinidade induzida pela aplicação da corrente catódica e 2) da superfície do concreto para a armadura (RAE externo) devido à penetração da solução alcalina em contato com o sistema anódico (Redaelli, E & Bertolini, L., 2011), sendo observado mais lentamente nas amostras submetidas a 1 A/m^2 (Figura 7).

Este comportamento de recuperação do pH em ambas as direções confirma uma produção de íons OH^- induzida pela aplicação de uma corrente catódica (Redaelli, E. & Bertolini, L., 2011, Castellote, M., *et al.*, 2006), e uma penetração do eletrólito alcalino através do concreto (Castellote, M., *et al.*, 2006), confirmando que mecanismos importantes são realizados durante o processo de RAE, como migração de íons entre o campo magnético, íons negativos migram em direção ao ânodo (aço malha), os íons positivos migram para o cátodo (aço da armadura); absorção devido aos efeitos de capilaridade das soluções alcalinas; difusão de compostos alcalinos devido às diferentes concentrações; e eletroosmose do eletrólito na superfície do concreto movendo -se em direção ao cátodo (Redaelli, E. & Bertolini, L., 2011, Castellote, M., *et al.*, 2003, Mietz, 1998 e González, F., *et al* 2011).

Em relação aos resultados de pH obtidos nas três intensidades de corrente utilizadas (Figura 19), os maiores valores foram apresentados em um tempo de realcalinização eletroquímica maior.

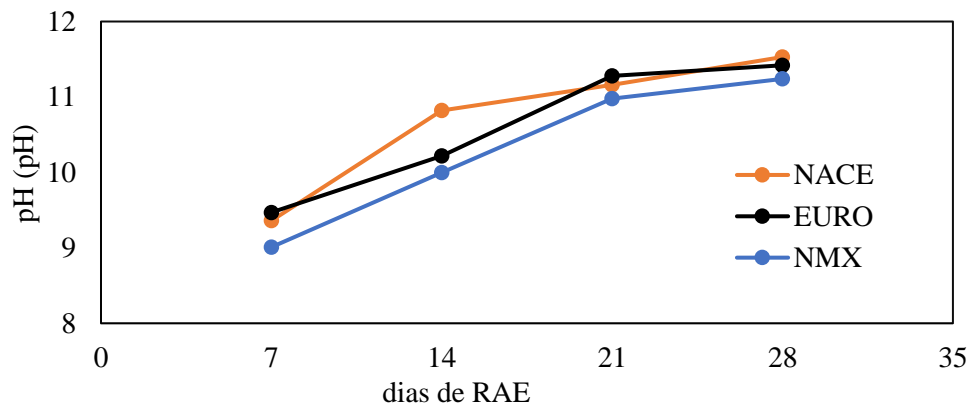


Figura 19. Valores de pH durante os 28 dias de tratamento com RAE.

3.3 Potencial de meia célula (Emc)

Foi visto que em estruturas de concreto armado o concreto atua como um eletrólito, e desta forma a armadura de aço imersa na matriz cimentícia desenvolverá um potencial que dependerá das características físicas e químicas do concreto.

Os resultados médios dos potenciais elétricos medidos diariamente durante os 28 dias de aplicação do RAE são apresentados a seguir. Essas medições foram feitas para obter um valor relativo da probabilidade de corrosão que poderia ter ocorrido na armadura durante este processo eletroquímico.

Estas amostras foram submetidas a intensidades de corrente de 1 A/m^2 (NMX), 2 A/m^2 (EURO) e 4 A/m^2 (NACE) por um período de 28 dias, no qual o revestimento de malha de aço galvanizado foi usado como ânodo e a haste de aço da armadura como cátodo. Durante este período, observou-se que o aço embutido manteve potenciais de meia célula muito negativos (inferiores a -350 mV), independentemente da intensidade de corrente aplicada, que de acordo com as disposições da norma ASTM C876-15 corresponde a uma probabilidade de corrosão de 90%. Esses valores indicam que o aço da armadura permaneceu em estado ativo durante todo o período de realcalinização eletroquímica.

A Figura 20 mostra o comportamento do potencial eletroquímico que os corpos de prova apresentaram em diferentes intensidades de corrente aplicada, onde pode-se observar que os valores de Emc apresentaram um comportamento diretamente proporcional à intensidade de corrente que foi utilizada. Ou seja, quanto maior a intensidade da corrente, maior o valor do potencial de corrosão e vice-versa. Essa intensidade de corrente atingiu valores $> -900 \text{ mV}$, devido à forte polarização catódica (Redaelli, E., & Bertolini, L., 2011). Das três normas utilizadas, as amostras de ensaio em condições NMX foram as que apresentaram valores menos negativos de Emc. No entanto, nos três casos de intensidades de corrente, os aços embutidos no concreto permaneceram ativos durante todo o processo de realcalinização eletroquímica. Após o tratamento, a Emc atingiu valores superiores a -200 mV , o que representa uma diminuição na probabilidade de corrosão de acordo com o previsto na norma ASTM C876-15, que segundo Redaelli, & Bertolini, (2011), representa eficácia do tratamento e sugere que a armadura atingiu a repassivação.

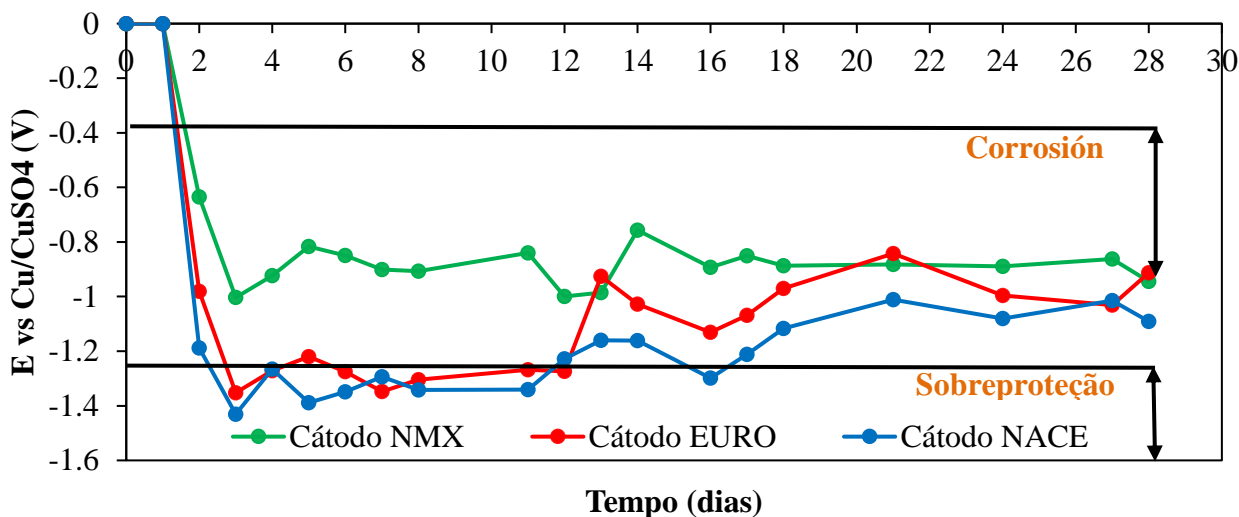


Figura 20. Valores médios de potenciais (V) durante os 28 dias de RAE submetidos a três diferentes intensidades de corrente.

Observa-se que com a aplicação da norma NMX-C-553-ONNCCE-2018, a região de sobreproteção não é atingida, razão pela qual não representa risco de produção de hidrogênio e fragilidade no aço. Para a norma europeia (UNE-EN-1504), a polarização atinge a faixa de superproteção durante os primeiros 12 dias, posteriormente aumenta seus valores potenciais fora da zona de risco de fragilização por hidrogênio. Nesses casos, é conveniente realizar ensaios de tração para verificar se o aço foi afetado pela geração de hidrogênio. É particularmente importante considerar em concreto com aço pós-tensionado ou protendido.

4. CONCLUSÕES

A ação do CO₂ sobre os compostos hidratados do cimento Portland produz uma diminuição do pH, modificando a composição química de compostos e formando vários compostos de carbonato.

Na aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica, a recuperação do pH (realcalinização) do concreto é obtida principalmente durante os primeiros 7 dias a 4 A/m², permitindo uma recuperação completa da espessura do concreto.

No entanto, o valor estável ou o leve aumento do pH juntamente com o aumento do teor alcalino na interface aço-concreto suportariam as condições que promovem a formação da camada passiva de aço que servirá de proteção após a aplicação do RAE. Portanto, a realcalinização eletroquímica pode ser aplicada como técnica preventiva em estruturas de concreto parcialmente carbonatadas.

Buscou-se uma recuperação do pH do concreto diretamente proporcional ao tempo, onde das três normas utilizadas, as amostras de ensaio nas condições estabelecidas na NMX-C-553-ONNCCE-2018 foram as que apresentaram valores menos negativos de E_{mc} sem atingir a região de sobreproteção, o que não representa risco de produzir hidrogênio e fragilidade no aço.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidad Veracruzana, campus Xalapa, à Universidade Autônoma de Campeche, ao Programa de Desenvolvimento de Pessoal Docente (PRODEP) e à Fundação Pablo García pelas facilidades oferecidas para a realização deste projeto.

Ao Dr. Victor Moo, por seu valioso apoio no projeto e desenvolvimento do dispositivo elétrico utilizado durante a realcalinização eletroquímica.

6. REFERÊNCIAS

- Aguirre-Guerrero, A. M., & de Gutiérrez, R. M. (2018), *Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA*. *Construction and Building Materials*, 193, 518-528. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195)
- Aguirre-Guerrero, A. M., Mejía-de-Gutiérrez, R., Montês-Correia, M. J. R. (2016), *Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments*. *Construction and Building Materials*, 121, 704-716. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038)
- Annual Book of ASTM Standards (2016), *Construction. Chemical-resistant materials; vitrified clay, concrete, fiber-cement products; mortars; masonry*. Section 4. Vol. 04.05.
- Andrade, C., Alonso, C., Rodríguez, J. (1989), *Remaining service life of corroding structures*. IABSE Symposium on Durability, Lisbon, Sep., pp. 359-363.
- ASTM C876-15. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- Bize, B. (2001), *Béton armé corrode: Les traitement électrochimiques*. In: CSTB Magazine, No. 136. juillet - août 2001.
- Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C. (2003), *Influence of the external solution in the electroosmotic flux induced by realkalisation*. in: *Mater. Construcc.*, vol. 53, no 271– 272. pp. 101– 111. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2003.v53.i271-272.294>
- Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C., Turrillas, X., Alonso, C., Campo, J. (2006), *In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: electro-osmotic flux and portlandite formation*. *Cem Concr Res*. 36:791–800. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.014>
- Castellote M., Llorente, I., Andrade C., Turrillas, X, Alonso, C., Campo, J. (2006), *Neutron diffraction as a tool to monitor the establishment of the electro-osmotic flux during realkalisation of carbonated concrete*. *Physica B*. 385– 386:26–528. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.263>
- Chatterji, S. (1994), *Simultaneous chloride removal and realcalisation of old concrete structures*. *Cement and Concrete Research* 24. No. 6. pp. 1051 -1054. DOI: [10.1016/0008-8846\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90028-0)
- CYTED – DURAR. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Reporte Final, Red Durar, CYTED, Maracaibo, (1997).
- Fajardo, G., Escadeillas G., Arliguie, G. (2006), *Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel reinforced concrete specimens contaminated from artificial seawater*. *Corrosion Science* 48, pp: 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.015>
- Del Valle Moreno, A., Pérez-López T., Martínez Madrid, M. (2001), *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Publicación Técnica No. 182, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- González Díaz, F. (2010), *Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*. Doctorado thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, F., Fajardo, G., Arliguie, G., Juárez, C. A., Escadeillas, G. (2011), *Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: An Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion*. *International Journal of Electrochemical Science*. 6. pp 6332 – 6349.
- Helene, P., Monteiro, J. (1994), *Can local repairs be durable solutions for steel corrosion in concrete structures*. *Annals of international Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, Vol. 2.
- Linares, D., Sánchez, M. (2003), *Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation*. *Rev. Tec Ing. Univ Zulia*, 26, 34-44.
- Mietz, J. (1995), *Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures*. *Materials and corrosion*. 46(9), 527-533. <https://doi.org/10.1002/maco.19950460904>

- Mietz, J. (1998), *Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures a state of the art report*. EFC N°24, IOM Communications Ltd, London.
- NACE (2007), *SP0107-2007 Electrochemical Realkalization and Chloride Extraction for Reinforced Concrete*
- Normas mexicanas del ONNCCE (2018), *NMX-C-111-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo*.
- Normas mexicanas del ONNCCE (2017), *NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- Normas mexicanas del ONNCCE (2015), *NMX-C-495-ONNCCE-2015 Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Potenciales de Corrosión del Acero de Refuerzo sin Revestir, Embebido en Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo*.
- Normas mexicanas del ONNCCE (2018), *NMX-C-553-ONNCCE-2018 Industria de la construcción - Concreto - Durabilidad - Métodos Electroquímicos de Rehabilitación (Intervención) Especializados (Realcalinización y Remoción de Cloruros) - Especificaciones y Métodos de Ensayo*
- Norma ACI 211.1. *Diseño de mezcla de concreto patrón*.
- Pollet, V., Dieryck, V. (2000), *Re - alkalization: specification for the treatment application and acceptance criteria*. Annual Progress Report, 1999 - 2000, COST 521, Workshop, Belfast, p. 271.
- Raharinaivo and Carpio, J. (1992). *The stepping down the current method: a new corrosion control for cathodic protection of steel*. Paper No. 228, NACE Conference Corrosion 92, Nashville USA, p. 9.
- Hussain, R. R., Tetsuya, I. (2011), *Enhanced electro-chemical corrosion model for reinforced concrete under severe coupled actions of chloride and temperature*. Construction and Building Materials Journal. Vol. 25, Issue 3. pp. 1305-1315, Elsevier, ISI.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.014>
- Redaelli, E., Bertolini, L. (2011), *Electrochemical repair techniques in carbonated concrete. Part I: electrochemical realkalisation*. J Appl Electrochem 41, 817–827. DOI:[10.1007/s10800-011-0301-4](https://doi.org/10.1007/s10800-011-0301-4)
- Ribeiro, P. H. L. C., Meira, G. R., Ferreira, P. R. R., Perazzo, N. (2013), *Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concretes – Influence of Material Characteristics and Thickness of Concrete Reinforcement Cover*. Elsevier. Construction and Building Materials 40. 280-290.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>
- Rincón, T., Rincón, O. (1994), *Electrochemical evolution of mortar based on acrylic and epoxy resins used to repair concrete structures*. 1st Mexican Symposium and 2nd International Workshop on Metallic Corrosion, Mérida, México.
- Tong, Y., Bouteiller, V., Marie-Victoire, E. Joiret, S. (2012). *Efficiency Investigations of Electrochemical Realkalisation Treatment Applied to Carbonated Reinforced Concret. Part I: sacrificial anode process*. Cem. Concr. Res. 42 (1), 84-94. DOI:[10.1016/j.cemconres.2011.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008)
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Report 4.82, The Swedish Cement and Concrete Association, Stockholm.
- UNE-EN 1504 Norma de productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón.
- Yeih, W., Chang, J. J. (2005), *A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete*. Construction and Building Materials 19. 516-524 p.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.006>

Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente

C. G. L. Nunes^{1*} , P. H. S. Pereira² , R. A. Melo³ ,

J. K. G. Rodrigues⁴ , L. C. F. L. Lucena⁴ 

* Autor de Contato: camilagluznunes@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

Recepção: 23/12/2021 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo otimizar a produção de misturas asfálticas a quente a partir da utilização de asfalto-borracha. Para isso, avaliou-se o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com diferentes ligantes: asfalto-borracha comercial (AB08), asfalto-borracha 10% (AB10) e 15% (AB15) de resíduos de borracha e asfalto convencional (PEN 50-70). Para a composição dessas misturas, os teores ótimos de asfalto foram definidos pela dosagem Marshall. Já para a realização dos ensaios mecânicos, foram ensaiados corpos de prova moldados com compactadores Marshall e Superpave. Pelos resultados obtidos, constatou-se que as misturas com AB08 e AB10, compactadas com o Superpave, apresentaram o melhor desempenho mecânico. Porém, o ligante AB08 já está disponível no mercado, o que facilita seu uso em obras de pavimentação.

Palavras-chave: mistura asfáltica a quente; asfalto-borracha; *Marshall*; *Superpave*.

Citar como: Nunes, C. G. L., Pereira, P. H. S., Melo, R. A., Rodrigues, J. F. K. G., Lucena, L. C. F. L. (2022), “Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 362 – 377, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

¹ Ph.D. student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

² Master's student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

³ Department of Civil Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

⁴ Department of Civil Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, C. G. L. Nunes contribuiu com a conceituação (50%), experimentação (60%), análise (100%) e redação do rascunho original (100%). P. H. S. Pereira contribuiu para a atividade de experimentação em 40%. R. A. Melo contribuiu com a conceituação (50%), orientação (100%) e redação – revisão e edição (70%). J. F. K. G. Rodrigues contribuiu com recursos para a realização dos experimentos (50%). L. C. F. L. Lucena contribuiu com a redação – revisão e edição (30%) e recursos para a realização dos experimentos (50%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Influence of unserviceable tires' rubber on the mechanical performance of hot mix asphalt

ABSTRACT

This work aimed to optimize the production of hot mix asphalt (HMA) from the use of asphalt-rubber. For that, the mechanical performance of asphalt mixtures produced with different binders was evaluated: commercial asphalt-rubber (AR08), asphalt crumb rubber 10% (AR10) and 15% (AR15), and conventional asphalt (PEN 50-70). For the composition of these mixtures, the optimum asphalt contents were defined by the Marshall design. To carry out the mechanical tests, specimens molded with Marshall and Superpave compactors were tested. From the results obtained, it was verified that AR08 and AR10 asphaltic mixtures, compacted with Superpave, carried out the best mechanical performance. However, the AR08 binder is already available on the market, which facilitates its usage in paving works.

Keywords: hot mix asphalt; asphalt-rubber; Marshall; Superpave

Influencia del caucho de desecho de neumáticos en el rendimiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo optimizar la producción de mezclas asfálticas en caliente utilizando caucho asfáltico. Para ello, se evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas producidas con diferentes aglutinantes: asfalto caucho comercial (AC08), asfalto caucho 10% (AC10) y 15% (AC15) de residuos de caucho y asfalto convencional (PEN 50-70). Para la composición de estas mezclas, el contenido óptimo de asfalto fue definido por el método *Marshall*. Para la realización de las pruebas mecánicas se ensayaron probetas moldeadas con compactadores *Marshall* y *Superpave*. De los resultados obtenidos se encontró que las mezclas con AC08 y AC10, compactadas con Superpave, presentaron el mejor desempeño mecánico. Sin embargo, el ligante AC08 ya está disponible en el mercado, lo que facilita su uso en trabajos de pavimentación.

Palabras clave: mezcla asfáltica en caliente; asfalto de caucho; *Marshall*; *Superpave*

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Os pneus inservíveis correspondem aos pneus usados que não podem ser reaproveitados por meio de reformas, por apresentarem danos irrecuperáveis em sua estrutura. Esses pneus correspondem a uma das maiores e mais problemáticas fontes de resíduos, devido ao grande volume de pneus produzidos e ao longo tempo que eles levam para se decompor. Além disso, os pneus inservíveis tornam-se ameaças à saúde humana e ao meio ambiente quando são descartados de forma inadequada (Lo Presti, 2013).

No Brasil, a forte dependência do modo rodoviário para o transporte de cargas e pessoas, impulsiona o mercado de pneus e, conseqüentemente, a geração de resíduos de pneus. Essa dependência eleva os custos operacionais de transporte, acelera o aparecimento de defeitos nos pavimentos e a necessidade de obras de conservação e manutenção. Portanto, a utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação é uma alternativa viável, não só para proteger o meio ambiente, mas também para diminuir os custos operacionais de transporte no país.

O asfalto-borracha apresenta inúmeras vantagens em relação ao asfalto convencional, como menor índice de penetração, flexibilidade e ductilidade sob baixas temperaturas, maior resistência à deformação permanente, maior resistência ao aparecimento de trincas sob baixas temperaturas e maior resistência à fadiga (Yetkin, 2007; Palit *et al.*, 2004; Xiang *et al.*, 2009). Outras vantagens incluem maior vida útil, menores custos de conservação e manutenção, redução do envelhecimento da mistura asfáltica e redução do ruído do tráfego (Sol-Sánchez *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2004; Chiu *et al.* Lu, 2007; Bueno *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2017).

Apesar dos benefícios, o asfalto-borracha ainda não é amplamente aceito e utilizado. Isso ocorre por dois motivos. O primeiro é a falta de treinamento profissional, em termos de domínio das várias técnicas e compreensão de algumas variáveis (por exemplo, teor de borracha, dimensões das partículas de borracha, superfície da borracha e estocagem). Segundo, faltam políticas públicas locais que estimulem o uso do asfalto-borracha (Lo Presti, 2013; Picado-Santos *et al.*, 2020).

O uso do asfalto-borracha ainda é baixo, no Brasil. No país, falta mão de obra especializada (Thives, 2009) e políticas públicas que incentivem o uso desse material. Assim, um dos objetivos deste estudo foi avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente (MAQ). As misturas foram produzidas com quatro tipos de ligantes: (i) asfalto-borracha comercial (AB08), (ii) asfalto-borracha 10% (AB10) e (iii) 15% (AB15) ambos produzidos em laboratório com resíduo de borracha de pneus, e (iv) asfalto convencional, ou seja, ligante asfáltico com penetração entre 50-70 (PEN 50-70), que é usual para pavimentação no Brasil. Além disso, objetivou-se também analisar a eficácia da faixa de agregados dominante (FAD), método de previsão de deformação permanente em misturas asfálticas, bem como analisar a influência do método de compactação (*Marshall* ou *Superpave*) no desempenho mecânico das misturas.

No Brasil, a especificação para a seleção granulométrica das misturas asfálticas fundamenta-se no enquadramento dos agregados em faixas granulométricas, sugeridas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Este método consiste em um procedimento de tentativa e erro, onde as proporções dos agregados componentes da mistura são ajustadas para o enquadramento nos limites dessas faixas. Portanto, este método não leva em consideração os efeitos da distribuição de agregados no comportamento mecânico das misturas asfálticas. Isso pode resultar em misturas com menor estabilidade e menor resistência à deformação permanente. Portanto, o conceito de porosidade FAD foi utilizado neste estudo para avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas.

A FAD é um método racional para selecionar a composição granulométrica das misturas asfálticas. O método é de simples aplicação e utiliza apenas um parâmetro, a porosidade FAD, que independe do tamanho nominal máximo da mistura asfáltica. Nesse método, considera-se que misturas com porosidade superior a 50% não proporcionam boa interação entre os agregados, o que as tornam

menos resistentes à deformação permanente. Estudos anteriores mostram a eficiência da aplicação deste método para obter um design adequado de dosagem, com menor propensão a desenvolver deformação permanente (Greene *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2009). Portanto, o método FAD foi utilizado para verificar a eficiência da escolha da composição da matriz de agregados.

Neste trabalho, o teor ótimo de asfalto foi determinado usando o design *Marshall*, uma vez que este método ainda é o mais utilizado no Brasil. Posteriormente, para a realização dos ensaios mecânicos, os corpos-de-prova foram moldados com compactadores *Marshall* e *Superpave*. Em estudos anteriores com outros materiais que também utilizaram essas duas compactações, verificou-se que corpos-de-prova compactados com *Superpave* tendem a apresentar melhores resultados em ensaios mecânicos. Esses melhores resultados geralmente são atribuídos à maior eficiência da compactação por amassamento utilizada pelo *Superpave*, em relação à compactação por impacto utilizada no *Marshall* (Assis *et al.*, 2017). Assim, neste trabalho, foram comparados os resultados obtidos com as duas formas de compactação.

2. PROCEDIMENTO

2.1 Materiais

Este estudo seguiu um procedimento experimental que teve início com a coleta dos materiais: PEN 50-70, AB08, agregados graníticos e borracha triturada de pneus. Esses materiais foram doados por empresas das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. A borracha obtida possui densidade de 0,99 g/cm³, e foi submetida a um peneiramento preliminar para remoção de partículas grosseiras que poderiam comprometer a homogeneidade da mistura com ligante convencional. A especificação ASTM D6114/D6114M-19 recomenda que não sejam utilizadas partículas de borracha muito grosseiras. Portanto, nesta pesquisa foram utilizadas as frações mais finas, com granulometria entre 0,15 e 0,59 mm.

2.2 Produção do asfalto-borracha

Na produção do asfalto-borracha em laboratório, 10% e 15% do teor de asfalto convencional foram substituídos por borracha, então foram produzidos os ligantes AB10 e AB15. Para esses ligantes, a borracha foi adicionada ao asfalto convencional em um misturador mecânico com rotação constante de 2.000 rpm e temperatura de 170°C por uma hora. Os ligantes AB10, AB15, PEN 50-70 e AB08 foram testados para determinar suas propriedades físicas. Esses testes incluíram penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, recuperação elástica e estabilidade à estocagem. Além disso, foram realizados testes para determinar as propriedades físicas dos agregados incluindo, granulometria, absorção, densidade, abrasão Los Angeles e ataque por sulfato de sódio. Os testes foram realizados de acordo com as normas do DNIT.

2.3 Design das misturas asfálticas

2.3.1 Seleção da composição granulométrica

Para determinação da composição granulométrica dos agregados utilizou-se o método de tentativas para o enquadramento da mistura na faixa C do DNIT. A porosidade FAD também foi calculada para estimar se a granulometria escolhida forneceria uma boa capacidade de resistência à deformação permanente às misturas. Antes do cálculo da porosidade FAD, foram escolhidas as faixas de agregados que iriam compor a FAD. De acordo com o método FAD, essa escolha deve ser feita com o auxílio de um diagrama de interação. Assim, devem ser selecionados dois tipos de agregados: (i) com granulometria superior a 1,18 mm e (ii) com razão percentual de material retido entre peneiras consecutivas de 0,43 e 2,33 mm. A porosidade foi determinada por meio da Equação (1):

$$\eta_{FAD} = \frac{VIC_{ag} + VAM}{VTM - V_{ag>FAD}} \quad (1)$$

Onde η_{FAD} corresponde a porosidade DASR (%); VIC_{ag} é o volume de agregados menores que a DASR; VAM são os vazios do agregado mineral; VTM é o volume total da mistura; $V_{ag>FAD}$ é volume de agregados maiores que a FAD.

2.3.2 Definição do Teor Ótimo de Asfalto

A dosagem *Marshall* foi utilizada para determinar o teor ótimo de asfalto. Corpos de prova cilíndricos foram moldados e compactados com 75 golpes de cada lado (norma brasileira DNER ME-043/95). Três parâmetros foram selecionados para determinar o teor ótimo de asfalto: volume de vazios, densidade aparente máxima e estabilidade máxima. Quatro dosagens (ou seja, uma para cada ligante) foram realizadas no total.

Para produção da mistura asfáltica com o PEN 50-70, os agregados foram aquecidos a temperatura de 165 °C por 24 horas e misturados ao ligante a 155 °C. Para as misturas com os três tipos de asfalto-borracha, os agregados foram aquecidos a 175 °C por 24 horas e misturados aos ligantes a 165 °C. Essas temperaturas foram obtidas por meio do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield realizado com os quatro ligantes asfálticos.

2.3.3 Ensaios Mecânicos

Para avaliar o desempenho mecânico, as misturas asfálticas foram submetidas aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida e *Flow number* (FN). Os testes foram realizados com corpos-de-prova produzidos pelos compactadores *Marshall* e *Superpave*. Cada ensaio foi realizado três vezes para analisar a precisão dos resultados. A Tabela 1 apresenta as normas que foram seguidas para a realização dos ensaios.

Tabela 1. Normas para os ensaios mecânicos

Ensaios	Normas
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT ME 136/2010
Módulo de resiliência	DNIT 135/2018-ME
Dano por umidade induzida	AASHTO T 283/2002
<i>Flow number</i>	NBR 16505/2016

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades Físicas

A Tabela 2 apresenta os resultados para as propriedades físicas dos agregados. Os critérios de aceitação são baseados na norma DNIT ES 031/2006 para pavimentos flexíveis.

Tabela 2. Propriedades físicas dos agregados naturais.

Propriedade	Valor do Ensaio	Limite
Abrasão Los Angeles (%)	27,53	Max. 50
Ataque por Sulfato de Sódio (%)	1	Max. 12
Absorção (%)		-
Brita 3/4"	0,51	
Brita 3/8"	0,79	
Densidade (g/cm ³)		-
Brita 3/8"	2,67	
Brita 3/4"	2,63	
Pó de Pedra	2,64	

De acordo com a Tabela 2, as propriedades físicas dos agregados graníticos atendem aos critérios das normas brasileiras. Portanto, os agregados podem ser usados para construir pavimentos flexíveis.

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas dos ligantes. Para o PEN 50-70, as normas do DNIT foram seguidas para cada ensaio, exceto para o ensaio de viscosidade. Para este ensaio, foram seguidos os critérios estabelecidos na ASTM D4402. Para os ligantes asfalto-borracha, foram seguidas as especificações da norma DNIT ES 111/2009.

Tabela 3. Propriedades Físicas dos Ligantes Asfálticos.

Ensaio	Ligantes Asfálticos				Norma - Asfalto Convencional	Norma Asfalto- borracha
	PEN 50-70	AB10	AB15	AB08		
Penetração (10 ⁻¹ mm)	69	44	36	45	50 – 70	30-70
Ponto de Amolecimento (°C)	51	62	64	62	Min. 46	Min. 55
Viscosidade <i>Brookfield</i> 135GC-SP21 (cP)	395	2.106	3.667	2,085	Min. 274	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 150GC-SP21 (cP)	203	1.132	1.735	1.096	Min. 112	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 177GC-SP21 (cP)	79	578	819	562	57 – 285	-
Recuperação Elástica (%)	0	57	39	61	-	Min. 50
Estabilidade à estocagem (°C)	0,5	5,0	8,5	5,5	-	Max. 9

De acordo com a Tabela 3, os ligantes PEN 50-70, AB08 e AB10 atendem às normas brasileiras. Por isso, os ligantes podem ser usados na produção de misturas asfálticas a quente. O ligante AB15 não pode ser usado porque não atende aos requisitos mínimos para o ensaio de recuperação elástica. No entanto, neste estudo, o procedimento de ensaios com AB15 foi mantido para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas produzidas com este ligante.

3.2 Composição Granulométrica das misturas

A Figura 1 apresenta a composição granulométrica das misturas asfálticas. A curva granulométrica é composta por: (1) 21% de brita 3/4", (2) 30% de brita 3/8" e 49% de pó de pedra. Esta composição foi utilizada para as quatro misturas asfálticas, e foi obtida por meio de um processo de tentativas,

para que a curva granulométrica se enquadrasse nos limites da Faixa C especificados na norma DNIT ES 031/2006.

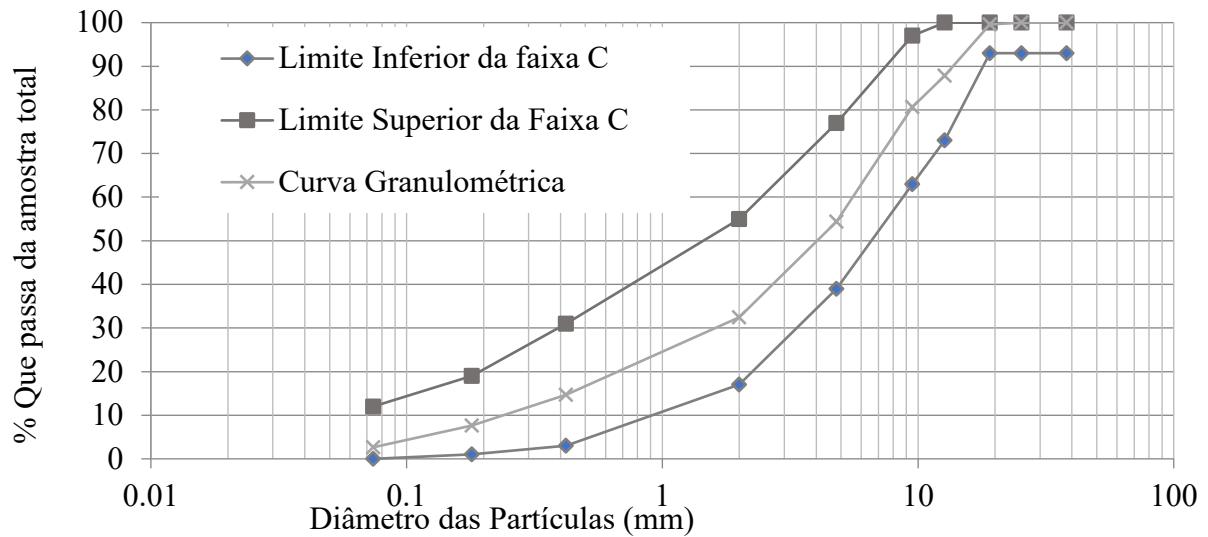


Figura 1. Curva Granulométrica das Misturas.

A composição granulométrica foi testada pelo método FAD, para prever se as misturas asfálticas teriam uma boa resistência à deformação permanente. Para aplicação do método FAD foi elaborado o diagrama de interação, apresentado na Figura 2. Esse diagrama permitiu definir quais os intervalos de agregados graúdos comporiam a FAD.

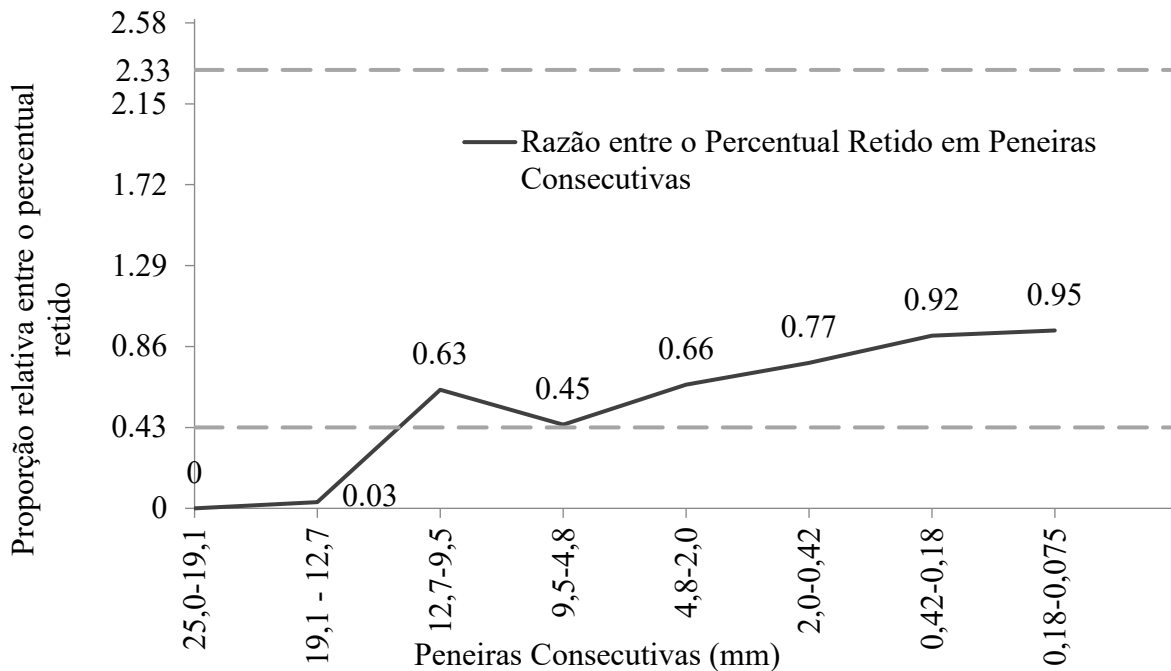


Figura 2. Diagrama de Interação entre agregados

De acordo com a Figura 2, as faixas de 12,7-9,5, 9,5-4,8 e 4,8-2,0 mm possuem agregados com granulometria superior a 1,18 mm. Além disso, a razão entre a porcentagem de material retido entre peneiras consecutivas varia de 0,43 a 2,33. A faixa 9,5-4,8 mm teve uma relação entre o percentual retido entre peneiras consecutivas muito próxima ao valor mínimo estimado para uma boa interação

entre os agregados. Portanto, essa faixa não foi considerada na seleção da FAD. Para a escolha entre as faixas 12.7-9.5 e 4.8-2.0 mm calculou-se a porosidade FAD que cada uma forneceria, por meio da Equação (1).

Para calcular o VAM na Equação (1), os valores de volume de vazios (V_v) e relação betume-vazios (RBV) foram assumidos, com base nos limites exigidos para esses parâmetros na norma DNIT ES 031/2006. De acordo com esta norma, as misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento devem ter um V_v entre 3 e 5% e um RBV entre 75 e 82%. Neste trabalho, os valores médios desses limites (V_v de 4% e RBV de 79%) foram utilizados para calcular o VAM. Assim, obteve-se um valor aproximado de VAM igual a 19%.

Para a η_{FAD} , foram obtidos os seguintes resultados: 53% para a faixa de 12,7-9,5 mm e 39% para a faixa de 4,8-2,0 mm. Portanto, apenas a faixa de 4,8-2,0 mm teve uma η_{FAD} inferior a 50%, que é considerada a porosidade mínima para que as misturas que apresentam boa resistência à deformação permanente. Portanto, esse intervalo foi utilizado para compor a FAD. Como a curva granulométrica obtida pelo método do DNIT apresentou um valor de η_{FAD} inferior a 50%, a composição dos agregados não precisou ser ajustada.

3.3 Dosagem Marshall

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a dosagem *Marshall* para os quatro tipos de ligantes.

Tabela 4. Parâmetros obtidos com a dosagem *Marshall*.

Propriedades	Ligantes Asfálticos				Norma Asfalto Convencional	Norma Asfalto Borracha
	PEN 50-70	AB10	AB15	AB08	DNIT ES 031/2006	DNIT ES 112/2009
Teor ótimo de Asfalto (%)	5,2	6,8	7,0	6,2	-	-
Estabilidade <i>Marshall</i> (kgf)	1.163	1.374	806	1.351	> 500	> 800
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,31	2,27	2,21	2,26	-	-
V_v (%)	3,86	4,99	4,87	4,92	3-5	3-5
VAM (%)	17	20	23	20	Min.16	Min.13
RBV (%)	77	74	78	75	75-82	65-78

A Tabela 4 mostra que a maioria das misturas com asfalto-borracha apresentam maior estabilidade *Marshall* que o ligante convencional. De acordo com Setyawan *et al.* (2017), a borracha proporciona melhor intertravamento e aderência entre os agregados e o ligante asfáltico, o que aumenta a estabilidade das misturas. Portanto, esperava-se que as misturas asfalto-borracha apresentassem melhores resultados. Para a mistura com o ligante AB15, também era esperado que as misturas com este ligante não apresentassem um desempenho mecânico tão bom quanto as demais misturas com asfalto-borracha, visto que ele não atendeu a todos os critérios físicos. A menor estabilidade e densidade *Marshall* da mistura AB15 estão relacionadas ao maior teor de borracha e à menor homogeneidade deste ligante. Esses fatores levaram a uma expansão volumétrica dos corpos de prova. Consequentemente, promoveram a redução da densidade e estabilidade dessa mistura.

Apesar da redução da estabilidade com o ligante AB15, observa-se na Tabela 4, que todas as misturas atenderam aos critérios das normas brasileiras em relação à dosagem *Marshall*. Após a determinação dos parâmetros volumétricos foi realizado o cálculo da porosidade FAD para cada mistura. Os resultados obtidos estão exibidos na Tabela 5.

Tabela 5. η_{FAD} após a dosagem *Marshall*.

Ligante Asfáltico	VAM (%)	η_{FAD} (%)	Critério
PEN 50-70	17	36	<50%
AB10	20	40	
AB15	23	44	
AB08	20	40	

A Tabela 5 mostra que as misturas com os ligantes AB10 e AB08 apresentaram η_{FAD} próxima ao valor estimado de 39% (antes da dosagem). As outras misturas apresentaram uma maior variação em relação a η_{FAD} estimada. Isso ocorreu devido pela maior variabilidade entre os valores de VAM obtidos após a dosagem e o VAM estimado de 19%. Apesar das diferenças, as estimativas foram aceitáveis com relação ao método FAD, pois todas as misturas apresentaram valor de η_{FAD} inferior a 50%.

3.4 Ensaios Mecânicos

3.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os métodos *Marshall* e *Superpave*.

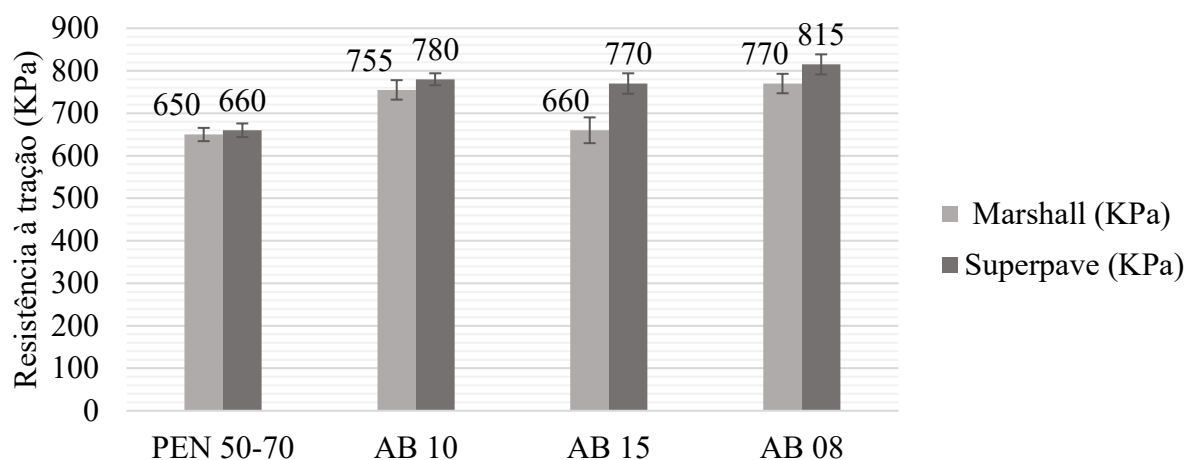


Figura 3. Resultados do ensaio de RT para cada mistura.

De acordo com a Figura 3, as misturas apresentaram maior RT quando compactadas pelo método *Superpave*. Esse resultado era esperado, já que o método *Superpave* simula melhor as condições de campo e tem menor risco de alterar a granulometria dos agregados.

A mistura com o ligante PEN 50-70 atendeu a resistência à tração mínima de 650 kPa (em conformidade com a norma DNIT ES 031/2006), tanto para o método *Marshall* quanto para o *Superpave*. Para misturas asfalto-borracha, a norma DNIT ES 112/2009 exige resistência à tração mínima de 750 kPa. Este limite foi atendido por todas as misturas, exceto pela mistura AB15 compactada pelo método *Marshall*.

Para a mistura AB15, os resultados do ensaio de resistência à tração indireta e a estabilidade *Marshall* podem ter sido influenciados pelo maior teor de borracha. O resultado do ensaio de estabilidade à estocagem, com valor próximo ao limite máximo permitido pela norma, demonstra que o maior teor de borracha leva a uma menor adesão entre a borracha e o ligante asfáltico, o que reduz a coesão e a homogeneidade da mistura (Navarro *et al.*, 2004; Navarro *et al.*, 2005; Shen *et*

al., 2009; Dantas Neto *et al.*, 2006; Navarro and Gámez, 2012), e consequentemente, resulta em valores mais baixos de RT e estabilidade (Navarro and Gámez, 2012).

3.4.2 Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência para os métodos *Marshall* e *Superpave*.

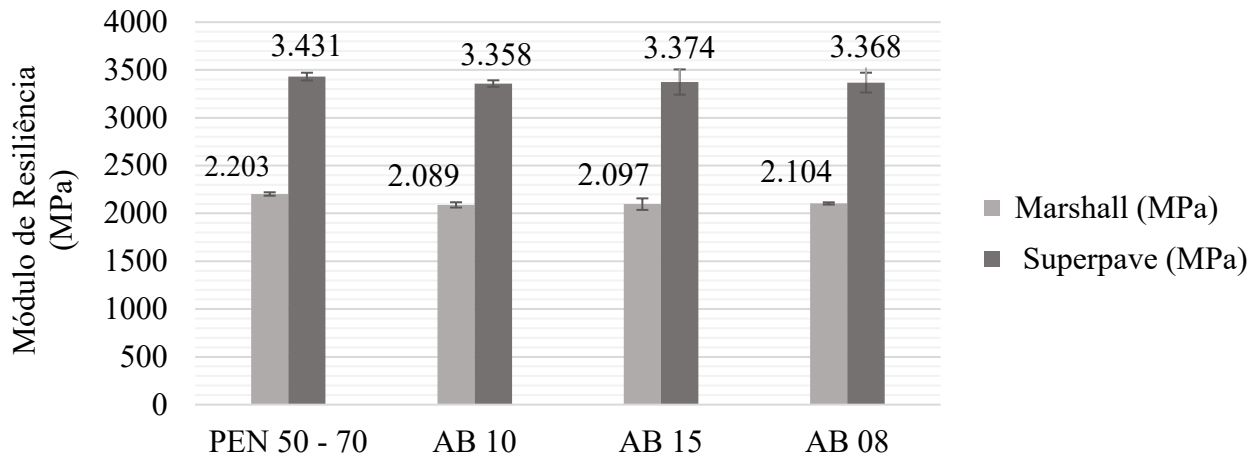


Figura 4. Resultados do ensaio de MR para cada mistura.

A Figura 4 mostra que as misturas asfalto-borracha apresentam menores valores de RM quando considerados os dois métodos. A redução do MR está relacionada à maior elasticidade das misturas asfalto-borracha. Em baixas temperaturas, essas misturas geralmente apresentam uma diminuição no módulo de resiliência em relação às misturas convencionais. Por outro lado, à medida que a temperatura aumenta, o valor do módulo tende a aumentar. Isso resulta em misturas menos quebradiças e mais flexíveis em baixas temperaturas, e com maior rigidez que as misturas convencionais em temperaturas mais elevadas (Palit *et al.*, 2004). Portanto, a redução do módulo de resiliência nas misturas com asfalto-borracha não significa que essas misturas tenham desempenho mecânico inferior em relação à mistura com PEN 50-70.

3.4.3 Dano por Umidade Induzida

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de dano por umidade induzida.

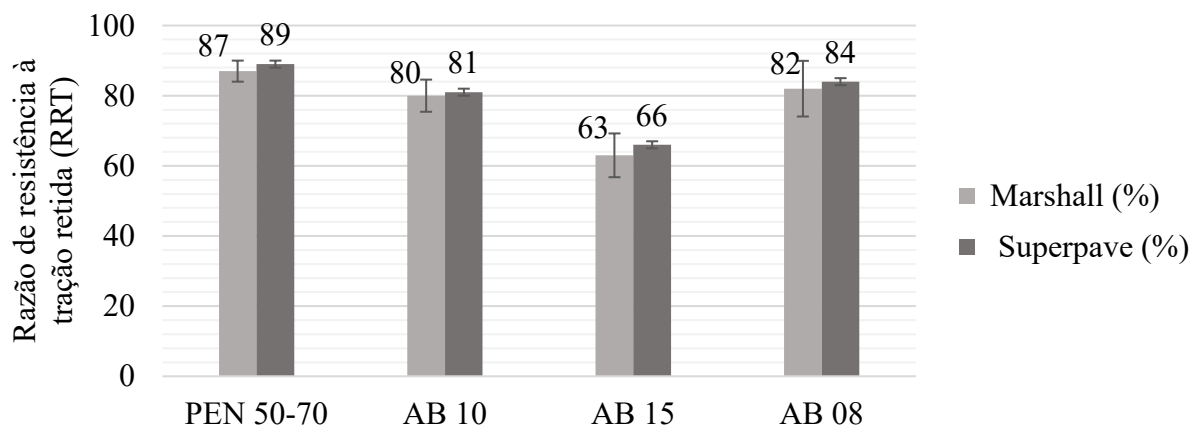


Figura 5. Resultados do ensaio de dano por umidade induzida para cada mistura.

A Figura 5 mostra que todas as misturas, com exceção da mistura AB15, atenderam ao requisito mínimo de RRT de 80%, conforme especificado na AASHTO T 283/2002. Menores valores de RRT foram obtidos para as misturas com o ligante asfalto-borracha. O *California Department of Transportation* observou que as misturas densas com o ligante asfalto-borracha são mais suscetíveis aos efeitos da umidade que as misturas convencionais. Portanto, recomenda-se o uso de aditivos melhoradores de adesividade nessas misturas (Shatnawi, 2001).

Neste estudo, foi utilizado um aditivo melhorador de adesividade em todas as misturas. As misturas AB10 e AB08 apresentaram boa resistência ao dano por umidade, embora os resultados tenham sido inferiores aos da mistura PEN 50-70. Em relação à mistura AB15, o uso do aditivo não foi suficiente para que a mistura atingisse o limite mínimo de 80% recomendado pela norma. Isso indica que essa mistura é mais suscetível ao dano por umidade.

3.4.4 Flow Number (FN)

A Figura 6 mostra os resultados do ensaio de FN para as misturas usando o método *Superpave*.

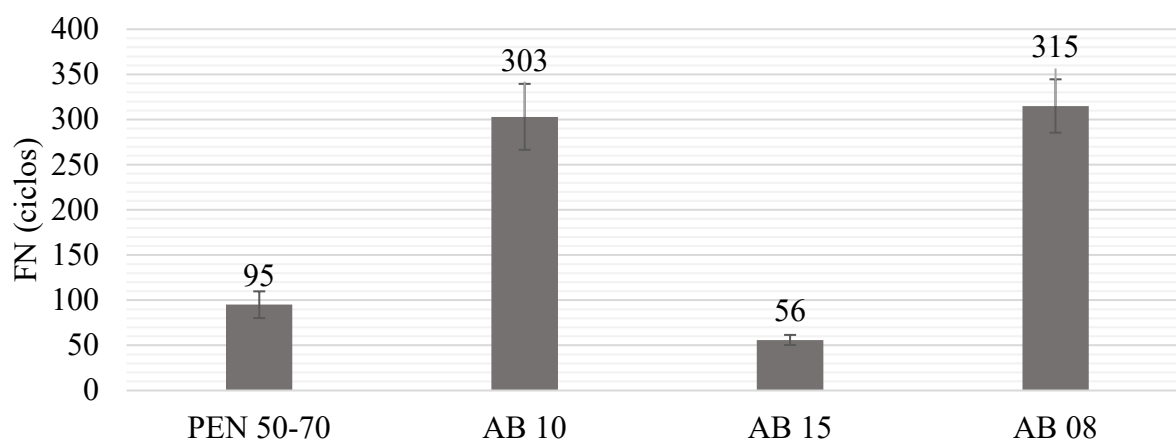


Figura 6. Resultados do ensaio de FN.

De acordo com a Figura 6, as misturas com os ligantes AB10 e AB08 apresentam melhores resultados em relação à mistura com o ligante convencional. Isso indica que essas misturas possuem uma maior resistência à deformação permanente. Os valores mais baixos para a mistura AB15 eram esperados devido aos resultados nos ensaios anteriores, que demonstraram que o maior teor de borracha e a menor homogeneidade afetaram negativamente o desempenho mecânico dessa mistura.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico que permite comparações entre médias de diferentes populações. Por isso, este método foi utilizado neste estudo para comparar o desempenho das diferentes misturas em cada ensaio. Para a ANOVA, o tipo de mistura (ou tipo de ligante no caso dos ensaios físicos) foi a variável explicativa. Quatro níveis (tratamentos) foram considerados: PEN 50-70, AB08, AB10 e AB15. Além disso, assumiu-se um nível de significância de 5% para testar duas hipóteses:

H_0 : os valores das médias dos tratamentos são iguais;

H_1 : pelo menos uma das médias dos tratamentos é distinta das demais.

A hipótese nula é rejeitada se o p-valor for menor ou igual ao nível de significância. Após o teste das hipóteses, foi aplicado o teste de Tukey para determinar se os pares de tratamentos eram

significativamente diferentes ou não. Os resultados do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, para os ensaios físicos, mecânicos com método *Marshall* e mecânicos com método *Superpave*, respectivamente.

Tabela 6. Resultados do teste de Tukey para os ensaios físicos.

Tratamento		p-valor – comparando pares de médias (ij)				
(i)	(j)	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade Brookfield	Recuperação Elástica	Estabilidade à Estocagem
PEN 50-70	AB08	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00171
	AB10	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00336
	AB15	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00006
AB08	AB10	0,91770	1,00000	0,28040	0,39200	0,93380
	AB15	0,00010	0,55530	0,00000	0,00000	0,03246
AB10	AB15	0,00018	0,55530	0,00000	0,00030	0,01464

*A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

Tabela 7. Resultados do teste de Tukey para os ensaios mecânicos com o método *Marshall*

Tratamento		p-valor - comparando pares de médias (ij)		
(i)	(j)	RT	MR	Dano por Umidade Induzida
PEN 50-70	AB08	0,00114	0,03360	0,71820
	AB10	0,00272	0,01633	0,48400
	AB15	0,95610	0,02392	0,00401
AB08	AB10	0,86120	0,94980	0,97230
	AB15	0,00198	0,99430	0,01556
AB10	AB15	0,00495	0,99160	0,02776

* A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

Table 8. Resultados do teste de Tukey para os ensaios mecânicos com o Método *Superpave*

Tratamento		p-valor - comparando pares de médias (ij)			
(i)	(j)	RT	MR	Dano por Umidade Induzida	FN
PEN 50-70	AB08	0,00006	0,81640	0,42600	0,00002
	AB10	0,00036	0,74480	0,12140	0,00003
	AB15	0,00066	0,85530	0,00035	0,28970
AB08	AB10	0,21800	0,99900	0,77230	0,93140
	AB15	0,09347	0,99980	0,00184	0,00000
AB10	AB15	0,92500	0,99580	0,00539	0,00000

* A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram que a hipótese nula foi rejeitada para todos os ensaios, exceto o Módulo de Resiliência pelo método *Superpave* (ou seja, houve diferenças significativas entre as médias dos tratamentos). Além disso, os ligantes AB08 e AB10, bem como as misturas com esses ligantes, não apresentaram valores médios significativamente diferentes (ou seja, p-valor superior a 0,05). Isso indica que não há diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades físicas e mecânicas dos dois ligantes.

A Tabela 6 mostra que houve diferenças significativas entre o ligante convencional (PEN 50-70) e os ligantes asfalto-borracha em todos os ensaios. Isso indica que os ligantes asfalto-borracha possuem propriedades físicas diferentes em relação ao PEN 50-70, o que indica que a borracha altera as propriedades físicas das misturas. Nenhuma diferença significativa era esperada no desempenho dos ligantes AB08, AB10 e AB15, uma vez que o ligante AB15 não atendeu aos requisitos mínimos dos ensaios físicos.

Para os ensaios mecânicos pelo método *Marshall*, os resultados da Tabela 7 indicam que não houve diferenças significativas nas capacidades de resistência à tração das misturas com os ligantes PEN 50-70 e AB15. Da mesma forma, não foram encontradas diferenças entre os resultados do ensaio de dano por umidade induzida das misturas com PEN 50-70, AB08 e AB10. Portanto, pode-se dizer que a redução da RRT nas misturas com AB08 e AB10 não afetou a resistência à umidade dessas misturas. O efeito oposto foi observado no ensaio de módulo de resiliência. Neste ensaio, a redução do MR das misturas asfalto-borracha em relação à mistura PEN 50-70 pode ser considerada significativa.

A Tabela 8 indica que os resultados obtidos com o método *Superpave* não apresentam diferenças significativas no ensaio de MR. Como este método simula as condições de campo de forma mais eficiente que o método *Marshall*, acredita-se que as misturas com asfalto-borracha não apresentam grandes variações de MR em relação à mistura PEN 50-70. Nos ensaios de RT e FN, verificou-se que houve diferenças significativas entre as misturas PEN 50-70, AB08 e AB10. Assim, pode-se dizer que o aumento de RT e FN observado nas misturas AB08 e AB10, foi de fato relevante em relação aos valores apresentados pela mistura PEN 50-70. Quanto ao ensaio de dano por umidade induzida, diferenças significativas foram observadas apenas com a mistura AB15. Isso era esperado, já que essa mistura mostrou uma maior redução no ensaio de dano por umidade induzida.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho mecânico de misturas asfalto-borracha, através de ensaios laboratoriais utilizados para a construção de pavimentos flexíveis. Nesse sentido, após a análise estatística realizada, pode-se afirmar que as misturas asfalto-borracha apresentaram melhor desempenho em relação à mistura PEN 50-70, o que torna seu uso viável. Uma maior recuperação elástica, uma menor suscetibilidade térmica, uma maior resistência à tração e a ocorrência de deformações permanentes podem ser citadas como vantagens das misturas AB08 e AB10 em relação à mistura PEN 50-70.

O ligante AB15 não pode ser utilizado em misturas asfálticas por não atender aos requisitos de recuperação elástica. No entanto, em alguns ensaios, teve um desempenho semelhante ao asfalto-convencional (PEN 50-70), e no caso do ensaio de MR semelhante também aos demais asfaltos-borracha. Portanto, acredita-se que o desempenho dessa mistura poderia ter sido satisfatório em todos os ensaios, se tivesse sido acrescentado algum agente compatibilizante ao ligante AB15, que aumentasse a sua homogeneidade.

Em todos os testes, as misturas AB10 e AB08 não apresentaram diferenças significativas. Isso significa que não foram encontradas diferenças significativas no desempenho mecânico dessas misturas, neste estudo. No entanto, o AB08 já é produzido em larga escala, o que o torna mais atrativo que o ligante AB10, produzido em laboratório para este estudo. Portanto, o uso do ligante AB08 seria mais adequado para a construção de rodovias.

Para a seleção granulométrica, o método FAD estima bom desempenho mecânico para valores de porosidade abaixo de 50%, mas essa estimativa não foi válida para a mistura AB15. No entanto, o desempenho inferior desta mistura é provavelmente devido à qualidade inferior do ligante AB15 (que em relação à escolha granulométrica). Portanto, nesta pesquisa não pode ser considerada insatisfatória a utilização do método FAD para a previsão do desempenho mecânico das misturas.

Quanto ao método de compactação, confirmou-se a tendência de estudos anteriores (Jitsangiam *et al.*, 2013; Swami *et al.*, 2004; Asi, 2007): os resultados do método *Superpave* foram melhores que os resultados do método *Marshall* em todos os ensaios. Por isso, o método *Superpave* deve ser preferido para a compactação de misturas asfálticas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, à empresa Greca Asfaltos, pela doação do asfalto-borracha, e à empresa DAFONTE Pneus, pela doação da borracha triturada de pneus. Agradecemos também aos técnicos de laboratório e colegas que ajudaram no desenvolvimento da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *AASHTO T 283 Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage*. Washington, D.C.
- Asi, I. M. (2007), *Performance evaluation of Superpave and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions*. *Construction and Building Materials*. 21:1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>.
- Assis, S. R. H., Queiroz, B. O., Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., Melo, R. A., Lucena L. C. F. L. (2017), *Evaluation of limestone crushed dust aggregates in hot mix asphalt*. *Construction and Building Materials*. 148: 659-665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.107>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 16505: Misturas asfálticas-Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2012). *ASTM 4402/D4402M Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotation al viscometer*.
- ASTM International. (2019). *ASTM D6114/D6114M-19 Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*.
- Bueno, M., Luong, J., Terán, F., Viñuela, U., Paje, S.E. (2014), *Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement*. *International Journal of Pavement Engineering*. 15:606-613. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2013.790547>.
- Chiu C., Lu, L. (2007), *A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber*. *Construction and Building Materials*. 21:1027–1033. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.005.
- Dantas Neto, S. A., Farias, M. M, Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Sousa, J. B. (2006), *Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders*. *Road Materials and Pavement Design*. 7:131–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690030>.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 112:2009-EM: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 111:2009-EM: Pavimentação flexível-Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006), *DNIT 031/2006 – ME– Método de ensaio. Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico - especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (1995). *DNER 043/1995–ME: Misturas Betuminosas a Quente. Ensaio Marshall – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). *DNIT 136/2010–ME: Método de Ensaio. Pavimentos flexíveis- Misturas asfálticas–Determinação da resistência à tração por*

compressão diametral. Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2018). *DNIT135/2018–ME: Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

Ding, X., Ma, T., Zhang, W., Zhang, D. (2017), *Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture*. Construction and Building Materials. 157:975–981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.164>.

Greene, J., Chun, S., Choubane, B. (2014), *Enhanced Gradation Guidelines to Improve Asphalt Mixture Performance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2456: 3–10. <https://doi.org/10.3141/2456-01>.

Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P., Nikraz, H. (2013), *An evaluation of the suitability of Superpave and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions*. Construction and Building Materials. 40:961–970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011>.

Kim, S., Roque, R., Birgisson, B., Guarin, A. (2009), *Porosity of the Dominant Aggregate Size Range to Evaluate Coarse Aggregate Structure of Asphalt Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering. 21: 32–39. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:1\(32\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:1(32))

Lee, S., Akisetv, C.K., Amirkhanian, S. N. (2008), *Recycling of laboratory-prepared long-term aged binders containing crumb rubber modifier*. Construction and Building Materials. 22:1906–1913. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.012>.

Lo Presti, D. (2013), *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 49 863-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2004), *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*. Fuel. 83:2041–2049. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.003>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2005), *Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen*. Energy & Fuels. 19:1984-1990. <https://doi.org/10.1021/ef049699a>

Navarro, F. M., Gámez, M. C. R. (2012). *Influence of Crumb Rubber on the Indirect Tensile Strength and Stiffness Modulus of Hot Bituminous Mixes*. Journal of materials in civil engineering. 24(6):715–724. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000436).

Palit, S. K., Reddy, K. S., Pandey, B. B. (2004), *Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering, 16(1): 45–53. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:1\(45\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:1(45)).

Picado-Santos, L.G., Capitão, S. D., Neves, J. M.C. (2020), *Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 247:118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>.

Setyawan, A., Febrianto, N., Sarwono, D. (2017), *Design and Properties of Thin Surfacing Hot Mix Asphalt Containing Crumb Rubber as Partial Aggregate Replacement*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 75: 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012016>.

Shatnawi, S. (2001), *Performance of Asphalt Rubber Mixes in California*. International Journal of Pavement Engineering. 2(1): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430108901713>.

Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Tang, B. (2009), *Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders*. Construction and Building Materials. 23: 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.005>.

Sol-Sánchez, M., Jiménez del Barco Carrión, A., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., Rubio-Gámez, M. del C. (2020), *Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures*. Construction and Building Materials. 265:120154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120154>.

- Swami, B.L.; Mehta, Y.A.; Bose, S. (2004), *A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India*. International Journal of Pavement Engineering. 5(3):163-173. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430412331309115>.
- Thives, L. P. (2009), “*Optimizing the performance of bituminous mixtures with rubber modified bitumen for pavement rehabilitation*”. Phd Thesis. University of Minho/ Federal University of Santa Catarina, p.581.
- Xiang, L., Cheng, J., Que, G. (2009), *Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt*. Construction and Building Materials. 23:3586–3590, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.038>.
- Yetkin, Y. (2007), *Polymer modified asphalt binders*. Construction and Building Materials. 21: 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>.

Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto

J. L. Pérez-Díaz^{1*} , J. A. Cabrera-Madrid¹ , D. Hernández Cruz¹ ,
E. A. Godínez-Domínguez¹ , M. D. Mundo Molina¹

*Contato Autor: jose.perez@unach.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.620>

Recepção: 24/06/2022 | Aceitação: 29/08/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

O risco devido à corrosão do aço foi avaliado, usando sensores galvânicos internos de carbono/aço inoxidável e eletrodo externo de Cu/CuSO₄. Os sensores foram utilizados para monitorar os potenciais e correntes de macrocélulas de corpos prismáticos de concreto armado, com relações água-cimento de 0,40 e 0,60, imersos em solução de NaCl a 5% por 18 meses. Os dois potenciais resultados mostrarão uma boa correlação entre os dois eletrodos de referência, podendo avaliar a corrosão do sistema. Além disso, a técnica de ruído eletroquímico se mostrou efetiva para o caso de íons cloreto. Portanto, sensores galvânicos podem ser considerados como úteis à implementação e monitoramento da avaliação do estado do risco de corrosão em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: aço reforçado; concreto reforçado; potencial de corrosão; macrocélula; sensor galvânico.

Citar como: Pérez, J. L., Cabrera, J. A., Hernández, D., Godínez, E. A., Mundo, M. D. (2022), “Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 378 – 400, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.620>

¹ Faculdade de Engenharia, Universidade Autônoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J. L. Pérez-Díaz contribuiu com a concepção da pesquisa e a realização de ensaios laboratoriais (100%), redação do texto (70%), análise e discussão dos resultados (60%) e revisão (50%). O autor JA Cabrera-Madrid contribuiu com a redação do texto (15%), análise e discussão dos resultados (15%) e revisão (15%). O autor D. Hernández Cruz contribuiu com a redação do texto (15%), análise e discussão dos resultados (15%) e revisão (15%). O autor EA Godínez-Domínguez contribuiu com a análise e discussão dos resultados (10%) e revisão (10%). O autor MD Mundo Molina com a revisão de 10%.

Licença Creative Commons

Os direitos autorais (2022) são de propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-lançamento

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na terceira edição do ano de 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento da segunda edição do ano de 2023.

Comparison between galvanic sensors (steel/stainless steel) and half cell potentials (Ecorr) for monitoring the corrosion risk of steel reinforcement in concrete structures

ABSTRACT

The corrosion risk of steel in concrete was assessed using internal galvanic carbon/stainless steel sensors and the external Cu/CuSO₄ electrode. The sensors were used to monitor the macrocell potentials and currents of reinforced concrete prismatic specimens, with water to cement ratios of 0.4 and 0.6, immersed in 5% NaCl solution, for 18 months. The results of the potentials showed a good correlation between the two reference electrodes, being able to evaluate the corrosion of the system. In addition, the electrochemical noise technique supports observations of the effect of chloride ions. Therefore, galvanic sensors can be considered for implementation in the monitoring and evaluation of corrosion risk of reinforced concrete structures.

Keywords: corrosion rate; reinforced concrete; corrosion potential; microcell; galvanic sensor.

Comparativa entre sensores galvânicos y potenciales de corrosión para el monitoreo del riesgo por corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto

RESUMEN

Se evaluó el riesgo por corrosión del acero en concreto, utilizando sensores galvnicos internos de acero al carbono/acero inoxidable y un electrodo externo de Cu/CuSO₄. Los sensores se utilizaron para monitorear los potenciales y corrientes de macrocelda de probetas prismáticas de concreto reforzado con relaciones agua-cemento de 0.4 y 0.6, inmersas en solución de NaCl al 5% durante 18 meses. Los resultados de los potenciales mostraron buena correlación entre los dos electrodos de referencia, pudiendo evaluar la corrosión del sistema. Además, la técnica de ruido electroquímico respalda el efecto por iones cloruro. Por lo tanto, los sensores galvnicos pueden considerarse para su implementación en el monitoreo y evaluación del estado de riesgo por corrosión en estructuras de concreto reforzado

Palabras clave: acero de refuerzo; concreto reforzado; potencial de corrosión; macrocelda; sensor galvnico

Informan legal

A Revista ALCONPAT  uma publican quadrimestral da Associan Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperan da Construn, Internacional, AC, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, CP 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Site: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo n 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualizan desta edin, Unidade de Tecnologia da Informan da ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores n refletem necessariamente a posin do editor.

A reprodun total ou parcial dos conteúdos e imagens da publican  realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras devido à presença de cloretos no concreto gera a deterioração das estruturas expostas a ambientes salinos, colocando em risco sua funcionalidade e segurança, reduzindo a durabilidade esperada. Isso causa custos consideráveis de inspeção e manutenção ou, em muitos casos, o risco de perda total da estrutura. Sensores galvânicos têm sido utilizados desde 1990 como método preventivo contra o ataque de agentes agressivos (Schiessl e Raupach, 1992). Principalmente para uma grande variedade de estruturas marítimas, onde a atuação desses sensores (par galvânico) pode detectar o momento em que a armadura despassiva e a corrosão é ativada pela presença de agentes agressivos. Sensores de macrocélulas de corrosão (Raupach, 1996) têm monitorado o risco de corrosão do aço da armadura, estrategicamente posicionados na área livre de cobrimento e áreas de difícil acesso, melhorando a previsão de vida útil ou ampliando o alcance do conhecimento de durabilidade existente (Raupach e Dauberschmidt, 2003), como complemento a outros sistemas de proteção. No entanto, ainda faltam avaliações e resultados com aplicações práticas utilizando outros tipos de materiais, sob diferentes condições de estudo, e onde possam ser esperados valores limites relevantes (Raupach e Schießl, 2001; McCarter et al., 2001). A corrosão galvânica é conhecida como corrosão de macrocélulas, os potenciais e correntes são medidos a partir da atividade entre um ânodo corrosivo e um cátodo passivo, onde ocorrerá a redução (Figura 1). A corrente registrada é uma medida da parte da corrosão causada pelo processo de redução catódica, não considerando a própria corrosão anódica (McCarter e Vennesland, 2004).

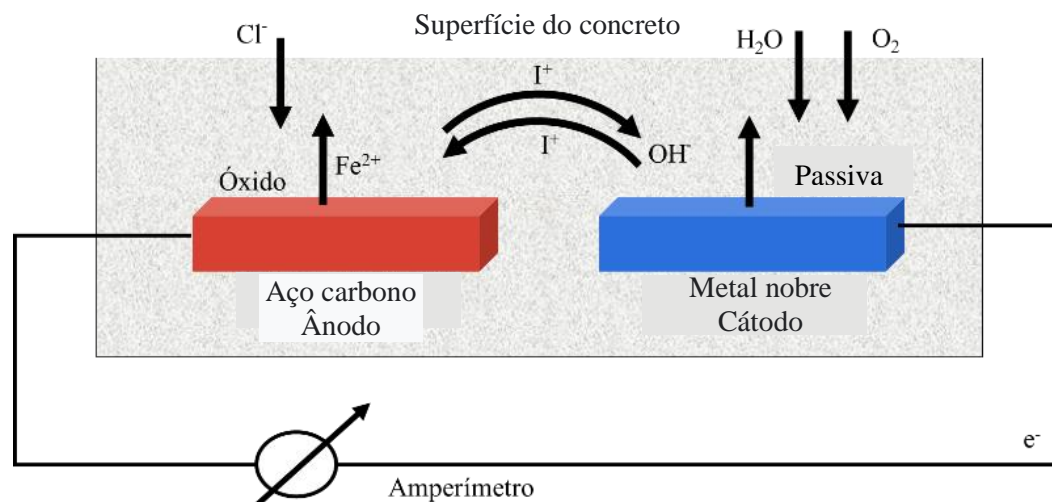


Figura 1. Esquema de Macro célula de Corrosão

Para que ocorra a corrosão eletroquímica do aço no concreto, devem ocorrer processos de oxidação e redução, onde as principais reações (equações 1, 2) são as seguintes:



O processo de corrosão no ânodo envolve ambas as reações, mas neste caso a corrente anódica é maior que a corrente catódica. No cátodo, a corrente catódica é maior que a corrente anódica, que forma a macrocélula de corrosão.

Muitos são os fatores que influenciam o funcionamento de uma macrocélula de corrosão no concreto, como o dimensionamento na forma geométrica e o tamanho dos sensores, a posição dentro da zona de cobrimento, bem como a separação entre ânodos e cátodos podem causar o

aumento ou diminuição dos valores da corrente galvânica (Arya e Vassie, 1995). Neste estudo, foram examinados os fatores influenciadores no sinal de corrente da macrocélula, tais como: a razão da área ânodo/cátodo, as distâncias de separação dentro das sondas e a altura em relação ao nível de imersão (posição vertical das sondas). Variáveis como a qualidade do concreto, espessura da área livre do cobrimento de armadura, monitoramento de potenciais e correntes de macrocélulas dos eletrodos sensores, foram consideradas para determinar o mecanismo de corrosão do sistema (Raupach e Dauberschmidt, 2003). Além disso, avaliar se a técnica de sensores galvânicos macrocélulas baseados em aço inoxidável 304 pode ser utilizada como método alternativo de monitoramento para detectar o risco de corrosão dentro do concreto. O aço inoxidável 304 foi utilizado por representar um material econômico para todos os fins, resistente à corrosão, com excelente resistência e ductilidade. Da mesma forma, embutido no concreto e colocado próximo ao aço da armadura, pode funcionar como um sistema de detecção interna na área livre de cobrimento. Tendo as características exigidas de um sensor resistente e de fácil implementação (Llorens et al., 2019), embora com uma relação de área exposta ânodo/cátodo diferente (sensor galvânico: aço carbono/aço inoxidável) e com diferentes condições de ensaio (ambiente submerso). A área livre de cobrimento também foi avaliada, onde a função útil do sensor é exposta para monitorar seu comportamento devido à corrosão na presença de íons cloreto, que entram no concreto a partir da solução de NaCl a 5% em peso em relação à água.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais para dosagem de concreto

Foram utilizadas duas dosagens de concreto preparadas de acordo com a NMX C155 (2014); com cimento Portland comum CPO 30R (NMX C414, 2004), brita com tamanho máximo de agregado de 19 mm (3/4”), agregado miúdo com módulo de finura de 2,71, água potável e relação água/cimento (a/c) de 0,60 e 0,40. Os corpos de prova de concreto foram curados em água por 28 dias de acordo com (NMX-C-159-ONNCCE-2004). Os dados de dosagem mostrados na Tabela 1 foram obtidos usando o método ACI-211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Tabela 1. Dosagem de concreto ((kg/m³ concreto) /proporção)

Traço	Cimento	Água	Cascalho	Areia	Aditivo
a/c 0,60	324	209	1035	765	Sem aditivos
a/c 0,40	513	209	1035	606	Sem aditivos

2.2 Configuração dos corpos de prova prismáticos

Foram confeccionados 16 corpos de prova prismáticos com dimensões de 17 x 20 x 30 cm; como armadura, foi utilizada uma configuração de 10 x 15 cm com hastes de aço carbono de 9,5 mm (3/8”) de diâmetro e estribos de 6,35 mm (1/4”) fixados com arame. Em cada corpo de prova, dois sensores foram colocados próximos ao aço da armadura conforme mostrado na Figura 2. Os ânodos foram colocados em faces opostas dos corpos de prova: na face 1 o ânodo A1 e na face 2 o ânodo A2, a uma profundidade de 8 cm e 22 cm no sentido longitudinal, em relação ao nível da água (NA) ou 5 % de solução de NaCl (NS). Foi deixada uma cobertura livre para o sensor de 3 cm, e a cobertura livre para as hastes da armadura nas faces expostas à penetração de cloreto foi de 3,5 cm. A área das faces expostas aos cloretos foi de 20 x 30 cm, enquanto as faces laterais dos corpos de prova (17 x 20 cm e 17 x 30 cm) foram cobertas com nata de cimento e impermeabilizante asfáltico à base de solvente, para restringir a penetração de cloretos (Figura 2).

Para identificação dos tubos de ensaio, eles foram rotulados com a sigla AP143, que corresponde ao número do tubo de ensaio 1 exposto em água potável (AP1), relação água/cimento de 0,40

(número 4) e armadura de aço de 9,5 mm (3/8") (número 3). As etiquetas SM563 referem-se à amostra número 5 exposta em salmoura (SM5), proporção água/cimento de 0,60 (número 6) e aço da armadura de 3/8" (9,5 mm) (número 3).

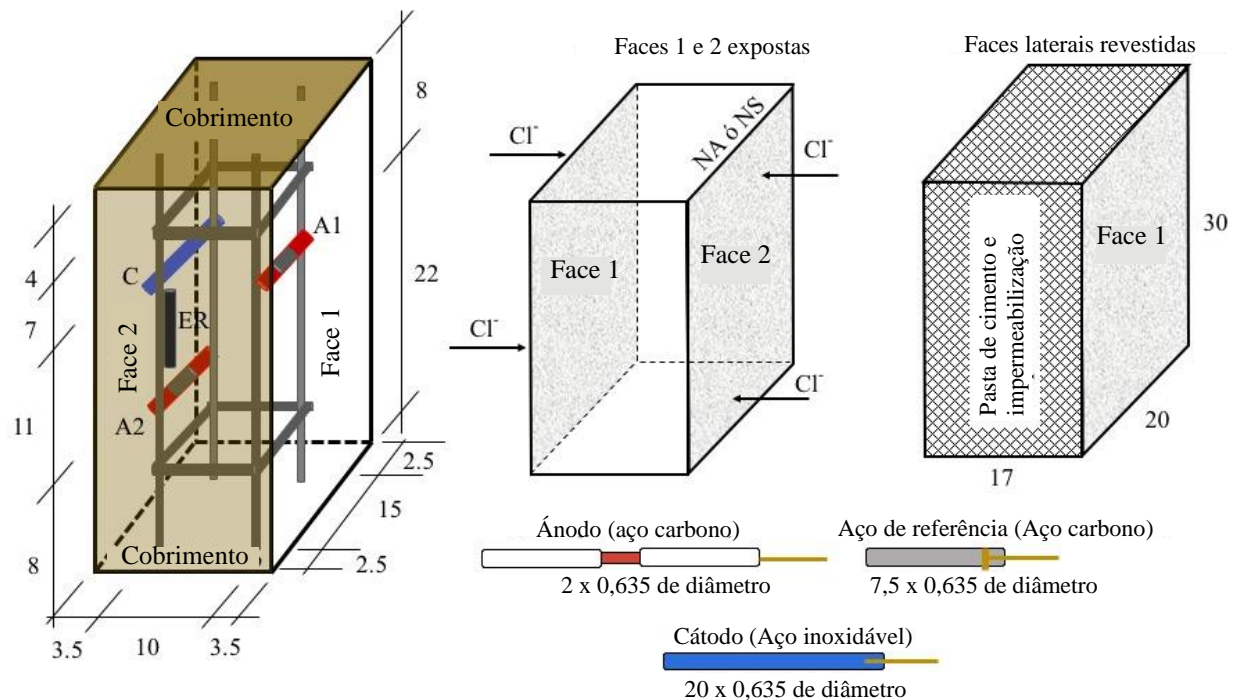


Figura 2. Diagrama dos corpos de prova de concreto armado e sensores galvânicos embutidos.

2.3 Sistema de sensores

Os sensores foram projetados como uma célula galvânica, composta por eletrodos de aço carbono (ânodos "A") e de aço inoxidável (cátodos "C"), que foram isolados da armadura por meio de mangueiras industriais. O aço de referência (AR) foi deixado em contato elétrico com a armadura. Foi utilizado fio de cobre para as conexões entre os eletrodos (Figura 3), deixando extensões para fora da barra para fechar o circuito elétrico e obter as medidas por meio de sinais elétricos. Deve-se notar que devido ao diâmetro do fio de cobre em relação ao dos eletrodos, não foi considerado um efeito representativo nos valores monitorados durante o tempo de ensaio. O sensor foi preso à armadura usando laços de plástico. A razão ânodo/área do cátodo foi de 1:10, correspondendo a 4 cm² para cada ânodo e 40 cm² para o cátodo. A área do cátodo maior que o ânodo foi utilizada para evitar baixas correntes galvânicas, principalmente para eletrodos de aço inoxidável; uma vez que uma quantidade semelhante de área entre o ânodo e o cátodo teria pouca eficácia na detecção de danos de corrosão do aço no concreto (Zinc-Taek et al., 2005).

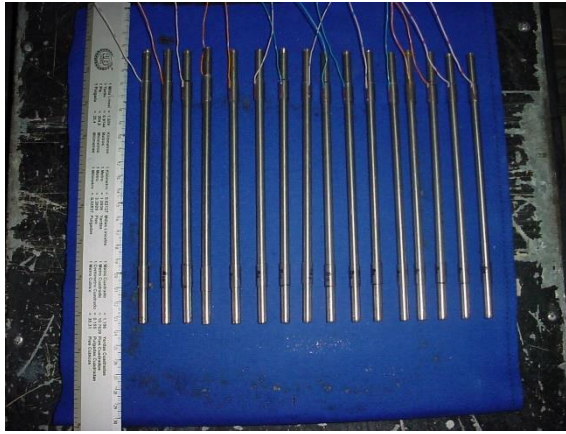


Figura 3. Cátodos de aço inoxidável tipo 304 com conexão de fio de cobre, fixados com mangueira industrial

Foi utilizado aço AISI-SAE 1020 (UNS G10200) como ânodo, da mesma composição da armadura; e aço inoxidável austenítico tipo 304 (UNS S30400) como cátodo (Tabela 2) (AISI-SAE, 1983; Hudok, 1990).

A análise da composição química elementar do sensor foi realizada com amostras de 3,0 g extraídas do material anódico e catódico. A digestão ácida foi realizada em micro-ondas (marca CEM modelo MDS-200), aplicando-se o método Still. 0,5 g de cada amostra foi preparado com HCl, HNO₃, HF e HBO₃. Para análise elementar, foram utilizadas as técnicas de Espectrometria de Emissão de Plasma (ICP-OES, modelo IRIS-AP), Espectrofotometria de Absorção Atômica (modelo FAA AVANTA SIGMA) e Analisador Elemental (modelo EA-1110) (PROCEDIMENTO LAQ03, 2005). Os resultados da análise são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química elementar do aço para os sensores e a referência

Elementos (%) peso	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	P	Fe	Cu	Mo	Co
Aço carbono 1020	0,041	0,027	0,198	0,429	----	0,021	0,02	bal.	0,021	----	0,014
Aço inoxidável 304	17,864	7,719	0,072	2,003	0,484	0,032	0,045	bal.	0,356	0,595	0,101

2.4 Exposição e monitoramento com técnicas eletroquímicas

Os corpos de prova prismáticos foram expostos por 18 meses em imersão em dois ambientes: em água potável (AP) e em solução de NaCl a 5% em peso em relação à água (salmoura "SM"). Durante a exposição, foi supervisionado que o mesmo nível de líquido fosse mantido e a solução fosse trocada a cada 3 meses. O mesmo número de corpos de prova com uma relação a/c de 0,60 e 0,40 foram expostos em AP e SM. A monitoração da tensão e corrente da macrocélula nos tubos de ensaio foi realizada por meio de um multímetro de alta impedância (FLUKE 87 III) através de um curto-circuito externo. Os potenciais de corrosão também foram medidos usando um eletrodo de referência externo de Cobre-Cobre Sulfato (Cu/CuSO₄) ou (CSC) (Figura 4).



Figura 4. Monitoramento com multímetro e eletrodo de referência Cu/CuSO₄

A técnica de ruído eletroquímico foi utilizada nos corpos de prova imersos em SM por 9 meses a partir do mês 10, devido à ativação dos corpos de prova de concreto de melhor qualidade ou mais densos nos meses 7, 8 e 9 expostos em solução de NaCl a 5% em peso em relação à água, para conhecer o efeito dos cloretos nos sensores (A1 e A2) e nas armaduras; utilizando um Potenciostato/Galvanostat SOLARTRON 1285. Esta técnica permite detectar e avaliar o comportamento da corrosão geral e localizada (Dawson, 1996), através das flutuações aleatórias do potencial ou da corrente do material sujeito à corrosão em relação ao tempo. Os resultados foram analisados visual e estatisticamente por meio do programa MATLAB. O arranjo do circuito para monitoramento é mostrado na Figura 5.

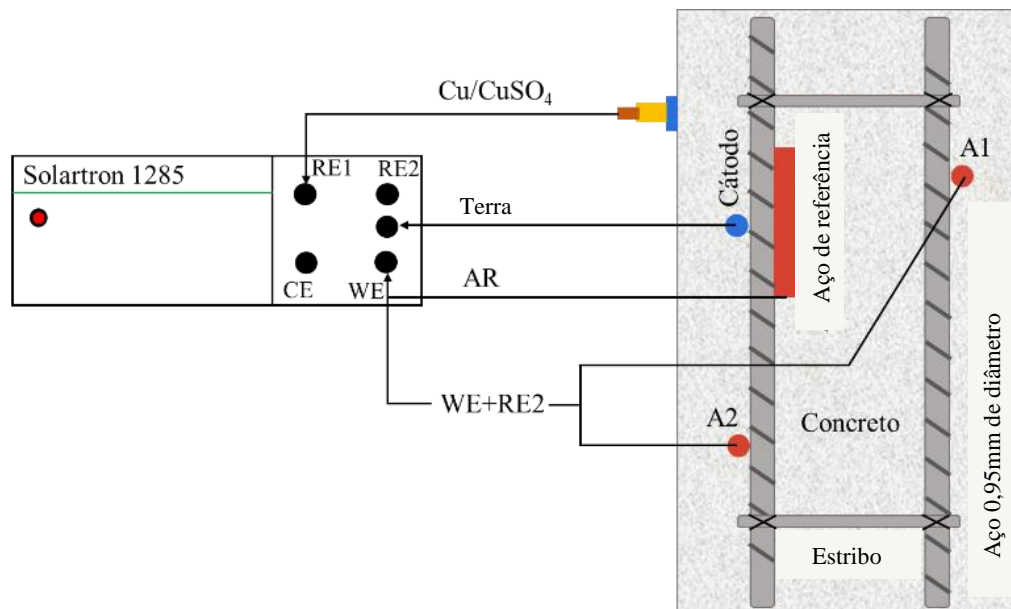


Figura 5. Diagrama para monitoramento de potencial e corrente ao longo do tempo

2.4.1 Monitoramento de potenciais e correntes

As tensões e correntes foram monitoradas individualmente para os ânodos A1 e A2, e, também, para o aço de referência (AR) em relação ao cátodo (Figura 6a). Assim, os potenciais de corrosão também foram medidos em relação ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, utilizando o aço de referência (AR), os ânodos (A1, A2) e o cátodo (C) como eletrodo de trabalho (Figura 6b).

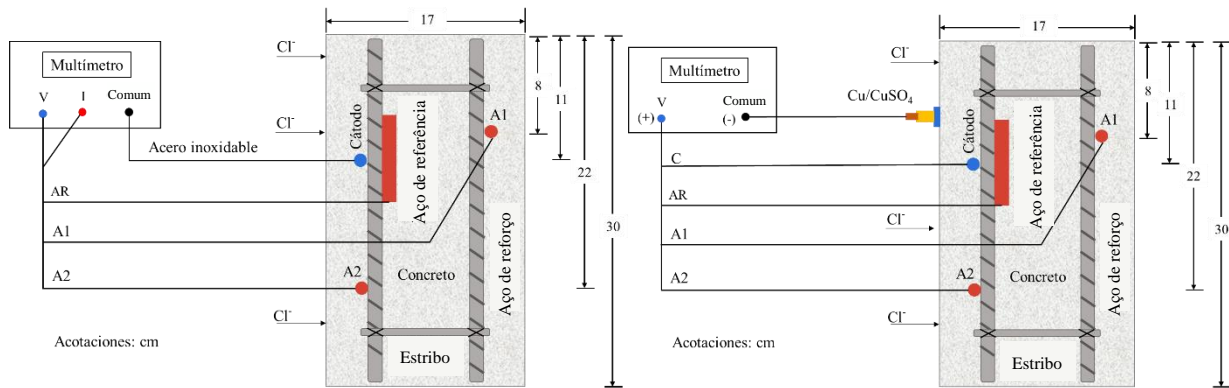


Figura 6a e 6b. Diagramas para monitorar tensões e correntes de macrocélulas e potenciais de corrosão

A análise das tensões das macrocélulas em relação ao aço inoxidável e os potenciais de corrosão em relação ao Cu/CuSO₄, foi realizada de acordo com os valores de referência da norma (ASTM C 876-91), estabelecendo uma equivalência de referência de ambos os eletrodos (aço inoxidável e Cu/CuSO₄) em relação ao eletrodo de hidrogênio normal (NHE) (Tabela 3). No entanto, a análise para a corrente da macrocélula foi realizada de acordo com as informações disponíveis na literatura, pois não existem valores padronizados dos níveis de corrente que indiquem o risco de corrosão para um sistema de concreto armado e sensores embutidos.

Tabela 3. Potenciais de corrosão vs Cu/CuSO₄ e sua equivalência para o aço inoxidável ASTM C 876-91.

Potenciais de corrosão (E _{corr}) (mV)	macrocélulas (V _{corr}) (mV)	Risco de dano (%)
Mais positivo que -200	Mais positivo que -95	10% de probabilidade de corrosão
Valores de -200 a -350	Valores de -95 a -166	Incerteza
Mais negativo que -350	Mais negativo que -166	90% de probabilidade de corrosão

2.5 Ensaios de cloreto

O teor de cloreto livre do concreto foi obtido a partir das amostras pulverizadas extraídas das áreas próximas aos ânodos e da armadura. Utilizando 30 g de amostra e seguindo o procedimento padrão (ASTM D 1411-99). As porcentagens de íons cloreto livres foram calculadas em relação ao peso de concreto e cimento, para o concreto com relação a/c de 0,40 e 0,60.

2.6 Ensaio de compressão simples

A resistência à compressão simples foi determinada após 28 dias de cura (NMX C159, 2004) de acordo com o procedimento ASTM C39-17 (ASTM International, 2017). Três corpos de prova cilíndricos de concreto de 15 cm de diâmetro por 30 cm de comprimento foram usados para cada relação a/c. A argamassa de enxofre foi usada para nivelar as seções transversais dos cilindros. O ensaio de compressão simples dos cilindros foi realizado com uma Prensa Hidráulica Elétrica Universal com capacidade de 120 Toneladas (Modelo ELVEC), equipada com bomba Modelo CT-715H. A velocidade de aplicação da carga foi de 5,3 kN/s, registrando a carga máxima até o colapso dos cilindros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Voltagens de macrocélulas

As tensões das macrocélulas dos ânodos A1, A2 e AR imersos nos corpos de prova com relação a/c de 0,40, e expostos em AP, foram superiores a -95mV , o que representa um baixo risco de corrosão (Figura 7). Para os ânodos A1, A2 e AR dos corpos de prova expostos em SM, os valores de tensão foram mais negativos que -166mV a partir do mês 7, representando uma alta probabilidade de corrosão (Figura 7). Além disso, o ânodo A1 (localizado a uma profundidade de 8 cm) apresentou valores de tensão mais negativos que o ânodo A2 (localizado a uma profundidade de 22 cm). Portanto, observou-se maior ativação dos ânodos A1 que estão mais próximos da superfície de imersão do que os ânodos A2. Embora o acesso de oxigênio seja mais restrito ou baixo em concreto úmido e submerso, os valores de corrosão são muito importantes e não necessariamente podem ser atribuídos apenas ao efeito do oxigênio (Alonso et al., 1998). Um comportamento incomum também foi observado no ânodo SMA2, que pode ser devido à heterogeneidade do concreto, sendo este um caso isolado não observado com os demais eletrodos deste trabalho.

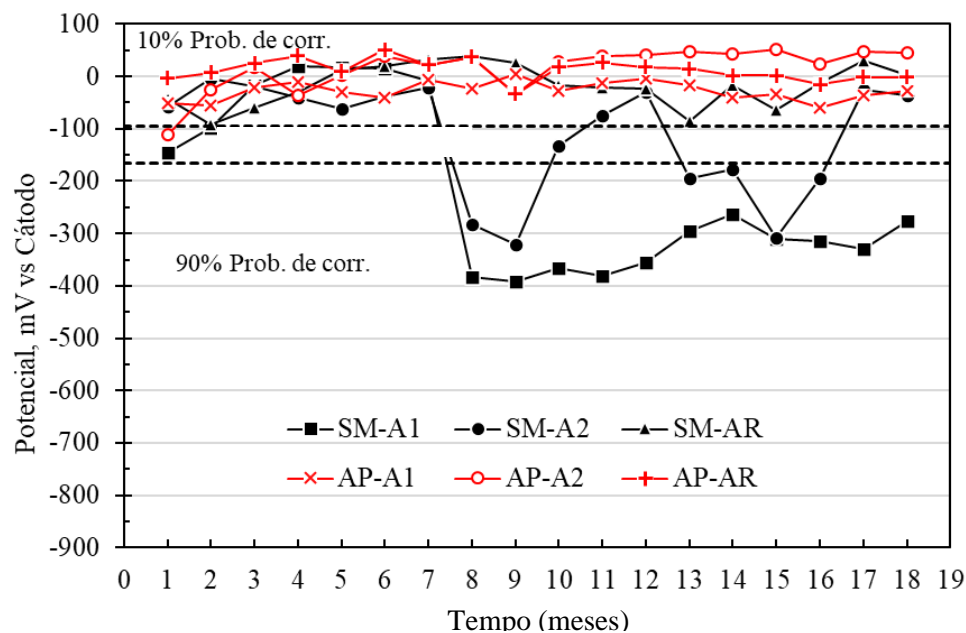


Figura 7. Potencial vs cátodo do tubo de ensaio com uma relação a/c de 0,40 exposto em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (VÓS).

Para os corpos de prova com relação a/c de 0,60 e expostos em AP, as tensões das macrocélulas dos ânodos A1, A2 e AR foram geralmente mantidas na zona de baixa probabilidade de corrosão, com valores mais positivos que -95mV (Figura 8). Enquanto os ânodos dos corpos de prova imersos em SM apresentaram valores de tensão mais negativos que -166mV , com tendência para valores com maior probabilidade de corrosão a partir do mês 2 de exposição (Figura 8). Da mesma forma, observou-se que o ânodo A1 apresentou maior vulnerabilidade à corrosão do que o ânodo A2, sendo um efeito semelhante ao apresentado nas vigas com a/c de 0,40 (Figura 7). Particularmente para o caso das armaduras de aço (SM-AR), observou-se uma diminuição gradual do potencial ou tensão da zona de baixa probabilidade de corrosão para a zona de alta probabilidade, atingindo potenciais de -300mV para os meses 17 e 18, mostrando praticamente a mesma tendência dos ânodos A1 e A2.

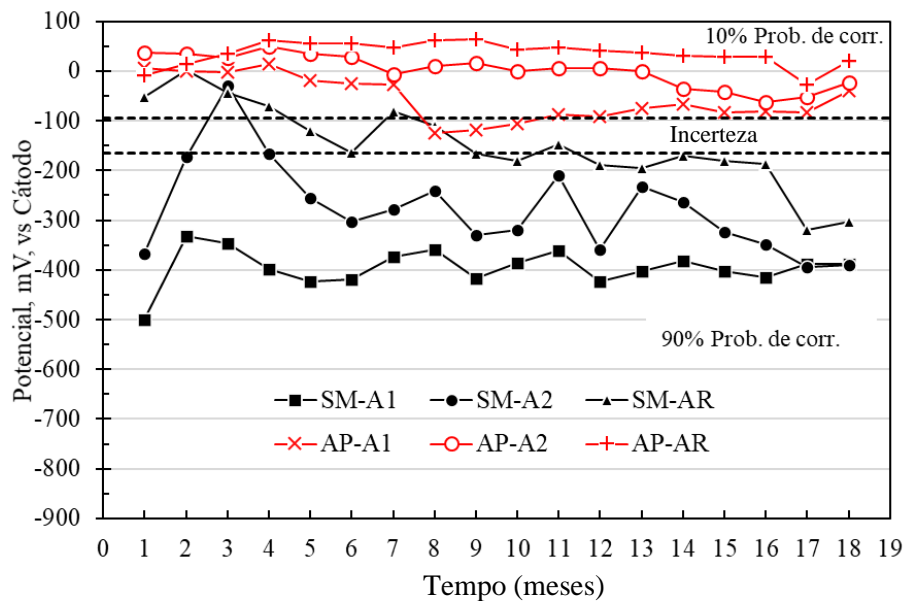


Figura 8. Potencial vs. cátodo de vigas com relação a/c de 0,60 expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

3.2 Potenciais de corrosão vs CSC (Cu/CuSO₄)

Os potenciais de corrosão dos anodos A1, A2 e AR em relação ao eletrodo CSC nos corpos de prova com relação a/c de 0,40 e expostos em AP, foram mais positivos que -200mV (baixo risco de corrosão) (Figura 9). No entanto, os ânodos dos corpos de prova expostos em SM atingiram valores de potencial mais negativos que -200mV, com indícios de alta probabilidade de corrosão após o mês 7. Observou-se também que o ânodo A1 apresentou maior vulnerabilidade à corrosão que o ânodo A2 (Figura 9). Isto sendo consistente com os resultados obtidos das voltagens das macrocélulas (Figura 7 e 8). Por outro lado, os potenciais do aço 304 utilizado como cátodo não representam um provável risco de corrosão para as vigas expostas em AP e SM, indicando um bom desempenho como meio de implementação para monitoramento de corrosão de estruturas de concreto armado (Figura).

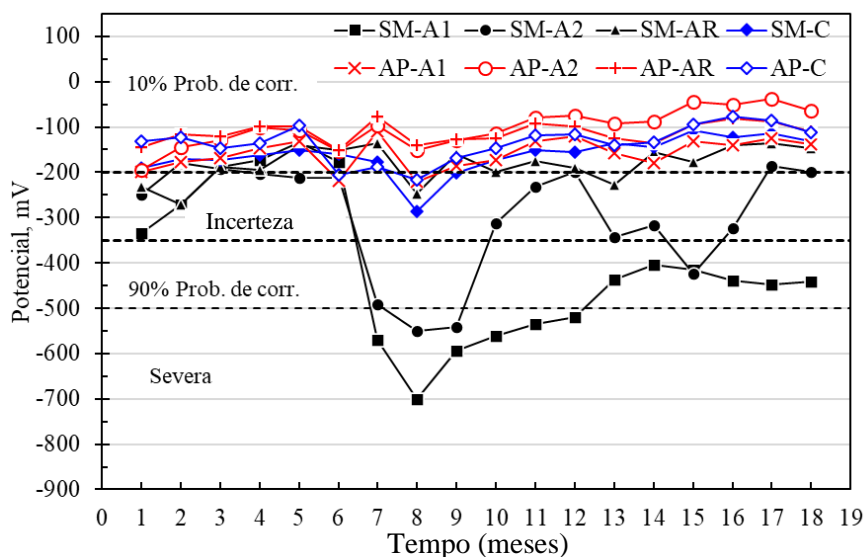


Figura 9. Potencial vs Cu/CuSO₄ de amostras com relação a/c de 0,40 expostos a água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

No caso dos corpos de prova com relação a/c de 0,60 e expostos em AP, os potenciais de corrosão de A1, A2 e AR vs CSC foram superiores a -200mV, ou seja, com baixa probabilidade de apresentar corrosão. Enquanto isso, os potenciais dos anodos nos corpos de prova imersos em SM mostraram tendências da zona de alta probabilidade para corrosão severa a partir do mês 2, com valores de -300mV a -700mV aproximadamente (Figura 10). Este mesmo efeito foi detectado nas voltagens das macrocélulas (Figura 7 e 8). Para os potenciais do aço da armadura, observou-se uma tendência para a zona de alto risco de corrosão, com potenciais de até -600mV para os meses 17 e 18. Enquanto o potencial do cátodo nos tubos de ensaio com relação a/c de 0,60 oscilou na faixa de -200mV a -350mV, sendo mais evidente entre os meses 5 a 10, geralmente representando baixo risco de corrosão.

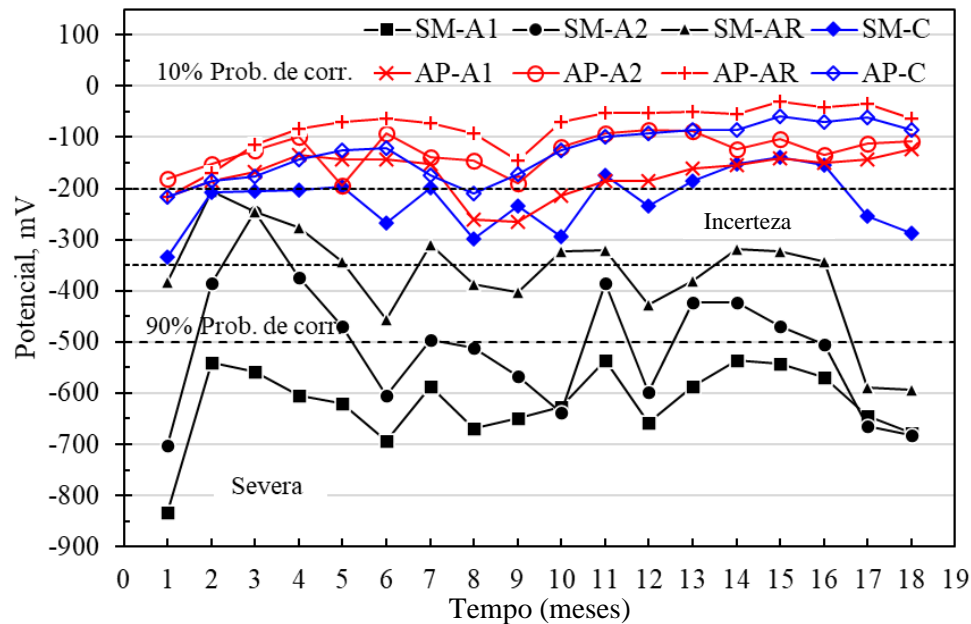


Figura 10. Potencial vs. Cu/CuSO₄ de espécimes com relação a/c de 0,60 expostos a água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

3.2.1 Comparação dos potenciais vs cátodo e vs eletrodo de cobre sulfato de cobre (CSC)

Utilizando os dados dos potenciais ou tensões das seções anteriores, a Figura 11 mostra as comparações entre os potenciais em relação ao cátodo e em relação ao CSC, correspondentes aos ânodos dos tubos de ensaio com relação a/c de 0,40 expostos em SM. Pode-se observar uma boa correlação dos potenciais obtidos com diferentes eletrodos de referência e durante o tempo de monitoramento. Portanto, esses sensores galvânicos podem ser uma opção viável para implantação e monitoramento de corrosão de estruturas de concreto armado.

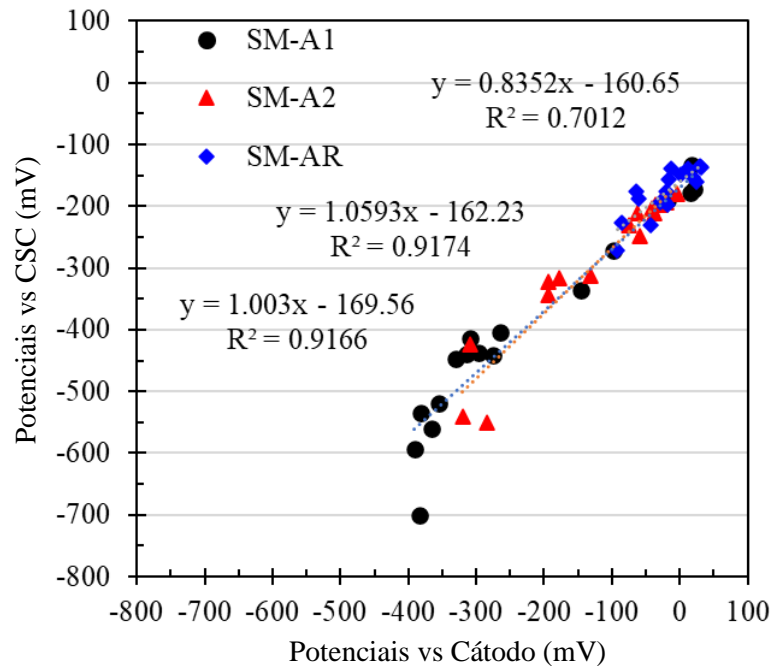


Figura 11. Comparação entre os potenciais de corrosão em relação ao cátodo e em relação ao eletrodo CSC dos ânodos dos corpos de prova com relação a/c de 0,40.

3.3 Densidades de corrente de macrocélula

Em geral, as densidades de corrente das macrocélulas para os sensores colocados nos corpos de prova com a/c de 0,40 expostos em HP apresentaram uniformidade entre os valores, estando dentro da área considerada como corrosão desprezível (Figura 12). No entanto, as densidades de corrente do sensor A1 dos corpos de prova SM expostos foram maiores a partir do mês 6, atingindo os valores considerados como corrosão moderada e alta (superior a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), o que também indica uma corrosão ativa (Figura 12). Embora o sensor A2 tenha indicado valores de ativação a partir do sexto mês, não foi mantido nos meses subsequentes, gerando uma passivação a partir do mês 10. Da mesma forma, observou-se que o sensor A1 dos corpos de prova expostos em SM, apresentou valores de correntes de macrocélula maior que A2, sendo influenciado pela profundidade em que os sensores estavam localizados e sua disponibilidade de oxigênio. Essa diferença também foi observada por medições das tensões e potenciais das macrocélulas em relação ao eletrodo CSC.

A diferença entre as correntes das macrocélulas dos sensores A1 maiores que A2, ambos expostos em AP e SM, pode ser devido à disponibilidade de oxigênio. Sendo que a difusão do oxigênio é menor em ambiente submerso, portanto a atividade de corrosão diminui (Tabela 4). Embora também tenha sido revelado em outros estudos (Alonso et al., 1998), que mesmo sob escassez de oxigênio, reações de redução podem ocorrer dentro do concreto.

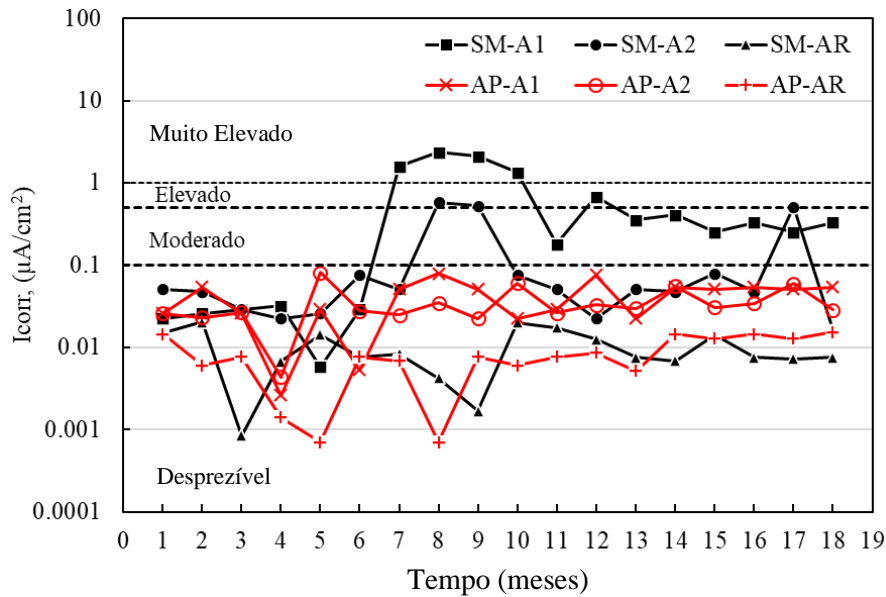


Figura 12. Densidade de corrente de macrocélulas das amostras com a/c = 0,40 expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

A Figura 13 mostra os resultados das densidades de corrente dos sensores colocados nos corpos de prova com relação a/c de 0,60, expostos em AP e SM. Pode-se observar que os valores de corrente obtidos nos anodos A1 e A2 expostos em AP, geralmente indicam corrosão desprezível (inferior a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), embora o sensor A1 (colocado a 8 cm de profundidade) tenha apresentado sinais de corrosão moderada a partir do mês 6. No caso dos sensores A1 e A2 dos corpos de prova expostos em SM, os valores atuais apresentaram inicialmente alta corrosão (maior que $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) com tendência à corrosão moderada (menos de $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) após o mês 10. Por outro lado, foi observado nos dois tipos de dosagens com uma relação a/c de 0,40 e 0,60 (Figura 12 e 13), que as densidades de corrente para os sensores AR expostos em AP e SM indicam estabilidade e corrosão desprezível.

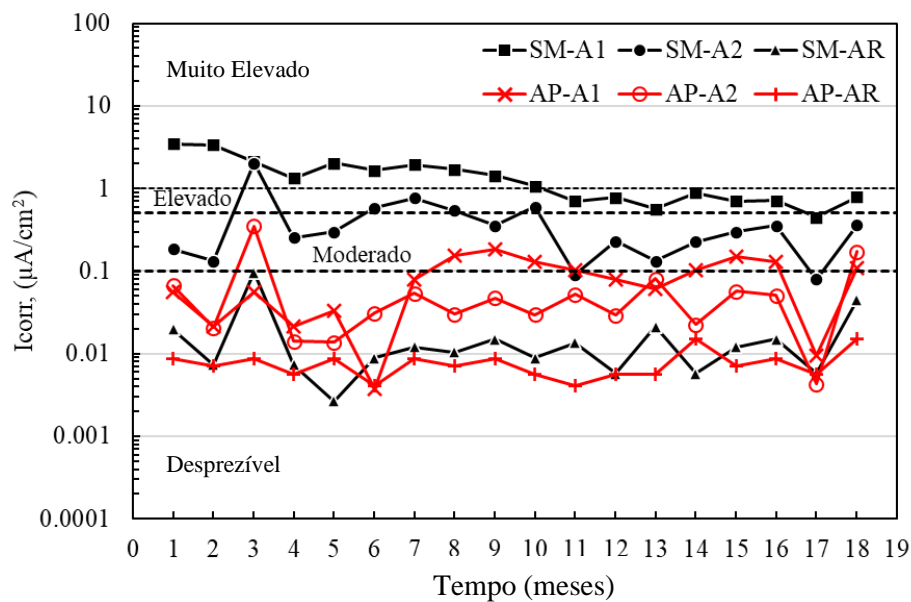
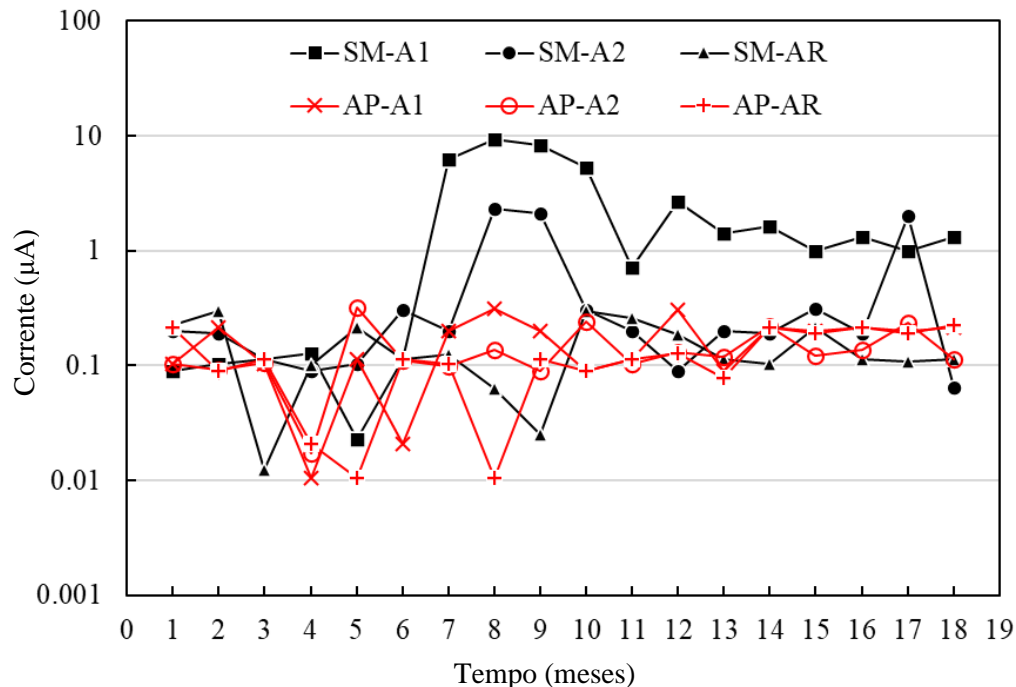


Figura 13. Densidade de corrente de macrocélulas das amostras com a/c = 0,60 expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

Tabela 4. Comparação dos valores limite de densidade de corrente

Tipo de sensor	Condições de ensaio	Área Rel.: Anodo/Catodo	Valores Limite	Referências
Aço/Aço Inoxidável 304	NaCl 5% imerso	1:10	3,50 μ A/ cm ²	Pérez et al., 2022
Aço/Aço Cobre /Aço Inoxidável	Gravidade - Imersão 3,5% NaCl	1:1	0,07 μ A/ cm ² -0,02 μ A/ cm ²	Parque Zink Taek, 2005
Aço/Aço Inoxidável 1.4301	Argamassa com 3% Cl ⁻ adicionada à água de amassamento	1:5	5,00 μ A/ cm ²	Elsner, 2002
Aço/Titânio-platina	Umidade e Secagem	1:8	3,00 μ A/ cm ²	Raupach e Schiebl, 2001
Aço/Aço Inoxidável 316	Umidade Relativa 95% e concreto com 3% Cl ⁻	1:30 1:33	3,85 μ A/ cm ²	Arya e Vassie, 1995

Na análise da intensidade de corrente de macrocélula (Figura 14) foi possível determinar que os sensores A1 colocados em menor profundidade nos corpos de prova expostos em SM apresentaram maiores correntes de macrocélula (9 μ A e 14 μ A para o concreto com a/c de 0,40 e 0,60, respectivamente) do que os sensores A2 localizados em maiores profundidades (2,40 μ A e 2,00 μ A para concreto com a/c de 0,40 e 0,60). De acordo com os primeiros valores de intensidade de corrente de macrocélula, verificou-se que eles eram semelhantes aos relatados na literatura, com valores limite de corrente galvânica de 15 μ A e 16 μ A. No entanto, a diferença encontrada pode ser devido a diferentes condições de ensaio, materiais dos sensores, relações anodo/catodo e arranjos geométricos dentro do concreto (Raupach e Schiebl, 2001 ; Elsner, 2002), Tabela 5 .



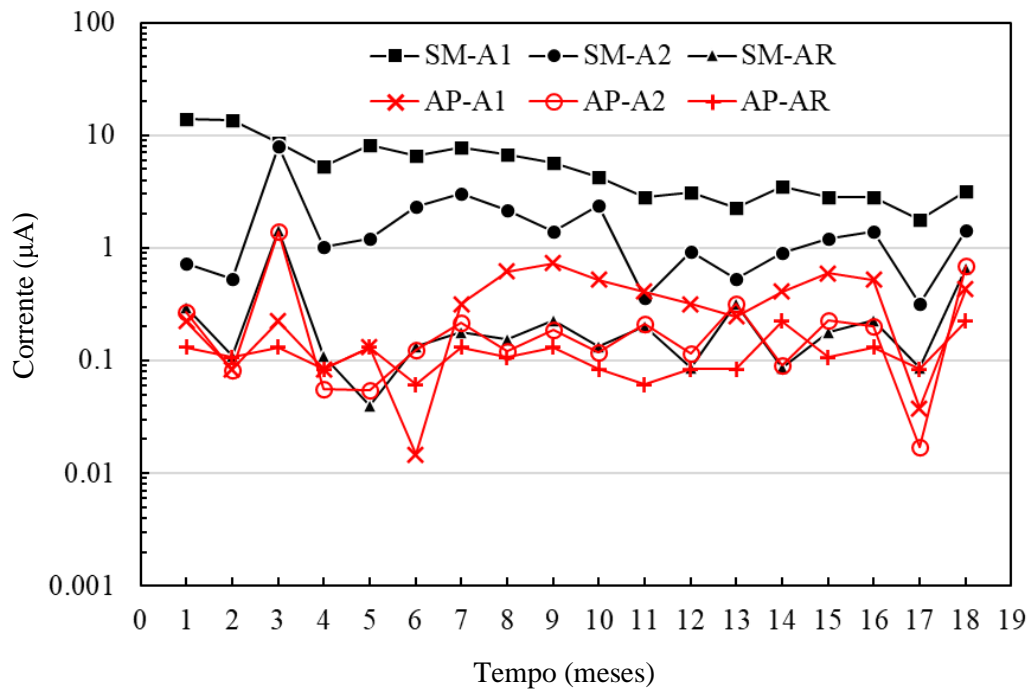


Figura 14. Intensidade de corrente da macrocélula dos corpos de prova com a/c = 0,40 e 0,60 expostos à água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

Tabela 5. Comparação dos valores limites atuais

Tipo de sensor	Condições de ensaio	Área Rel.: Anodo/Catodo	Valores Limite	Referências
Aço/Aço Inoxidável 304	Imerso em 5% NaCl	1:10	14µA	Pérez et al., 2022
Aço/Aço Inoxidável 1.4301	Argamassa com 3% Cl ⁻ adicionada à água de amassamento	1:5	16µA	Elsner, 2002
Aço/Titânio-platina	Molhagem e Secagem	1:8	15µA	Raupach e Schiebl, 2001

3.4 Ruído eletroquímico

Devido à ativação nula obtida dos sensores em AP, são mostrados apenas os resultados de ruído eletroquímico dos corpos de prova expostos em SM, e sua análise para determinar o tipo de corrosão do sistema. Os dados de potencial (E) e atual (I) foram registrados com 1024 pts, a 1 pt/seg.

A Figura 15 e a Figura 16 mostram os gráficos de exemplo das séries de densidade de potencial e corrente ao longo do tempo para os ânodos A1, imersos em concreto com uma relação a/c de 0,40 e 0,60, respectivamente. Em ambas as dosagens de concreto, observou-se uma correspondência de comportamento entre as séries de potencial e corrente, apresentando oscilações aleatórias dos sinais com transientes de 1,0 mV e 1,0 µA/cm² no sinal base do potencial e da corrente. Este tipo de comportamento foi associado a um tipo de corrosão generalizada.

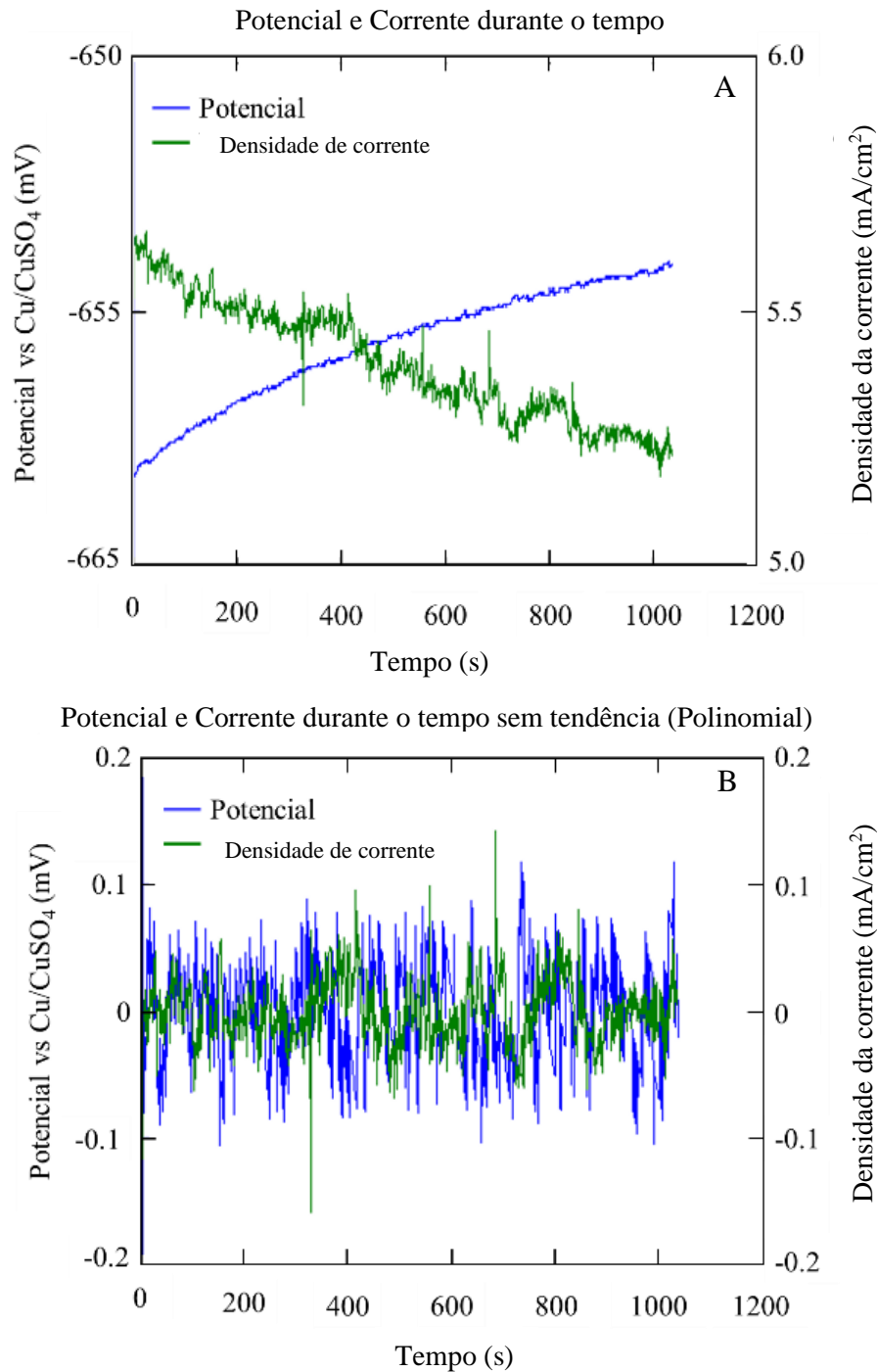


Figura 15. Séries de potencial e corrente ao longo do tempo obtidas do ânodo A1 especificamente com a/c 0,60, após 10 meses em SM: com tendência (A) e com remoção de tendência (B).

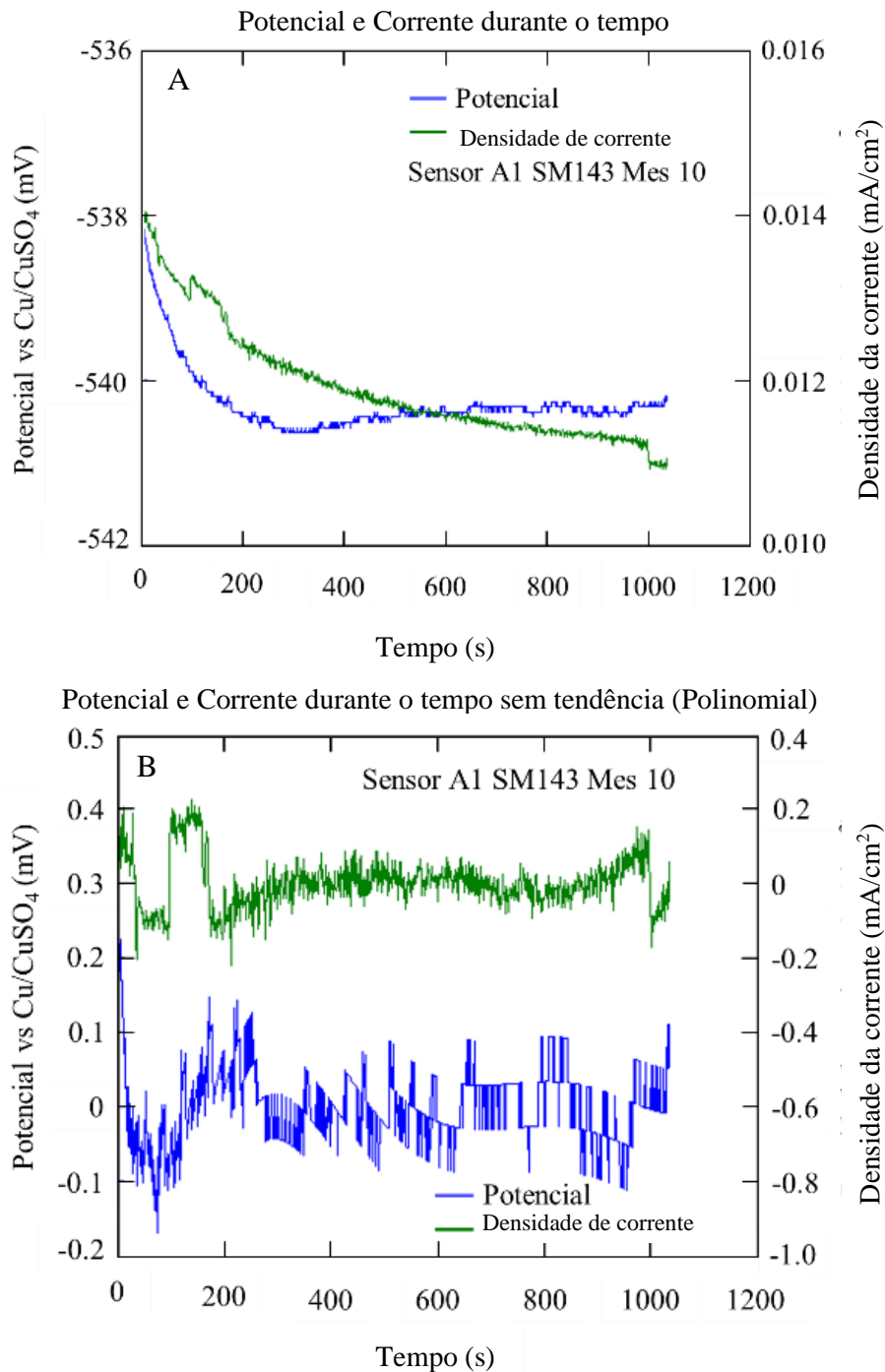


Figura 16. Séries de potencial e corrente ao longo do tempo obtidas do sensor A1 especificamente com a/c 0,40, após 10 meses em SM: com tendência (A) e com remoção de tendência (B).

As Figuras 17 e 18 mostram alguns gráficos de exemplo das densidades espectrais de potencial e densidade de corrente dos anodos A1, para concreto com relação a/c de 0,60 e 0,40, após 10 meses de exposição. Através desses gráficos foi possível determinar as inclinações com as quais o fenômeno de corrosão nos anodos foi avaliado. Para este caso, declives mais acentuados foram considerados indicativos de alguma atividade de corrosão.

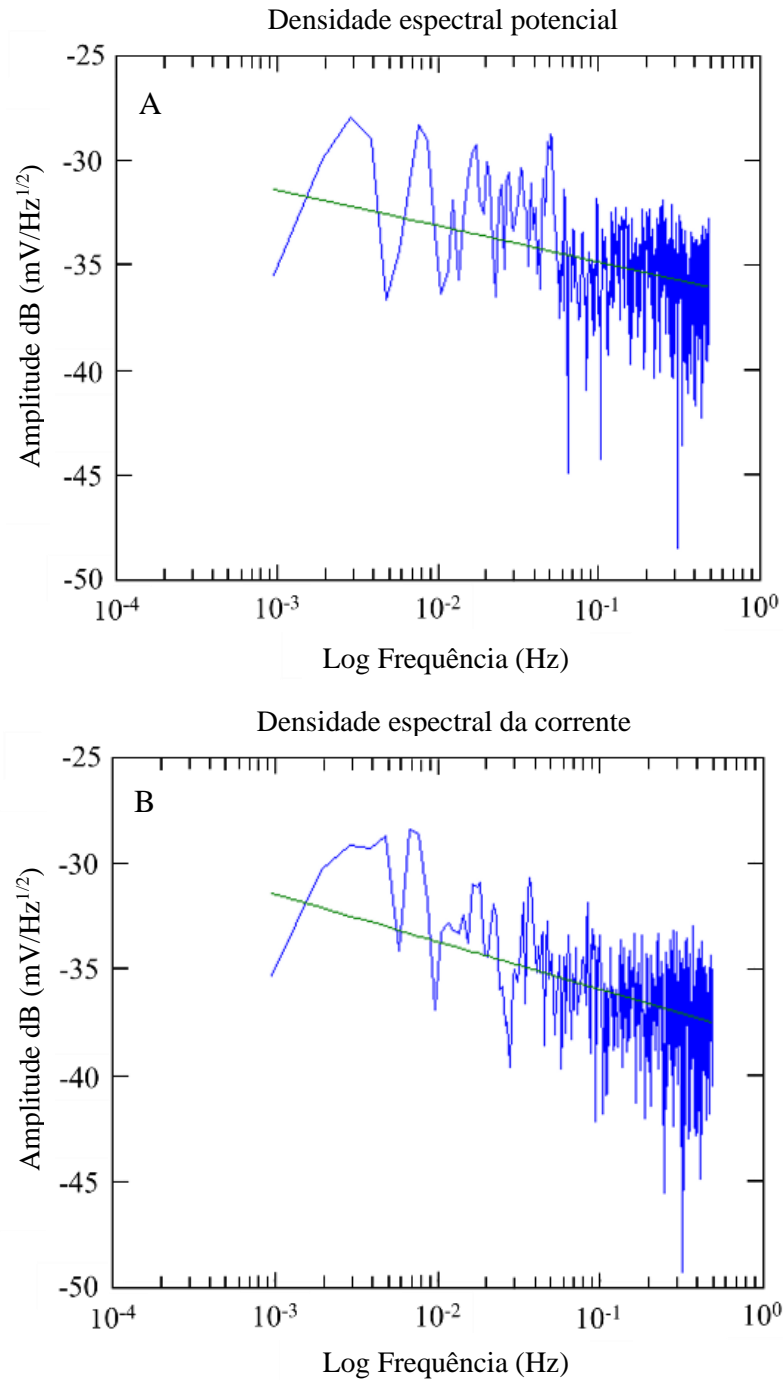


Figura 17. Densidades espectrais de potenciais e correntes ao longo do tempo, obtidas do sensor A1 especificamente em a/c 0,60 após 10 meses de exposição.

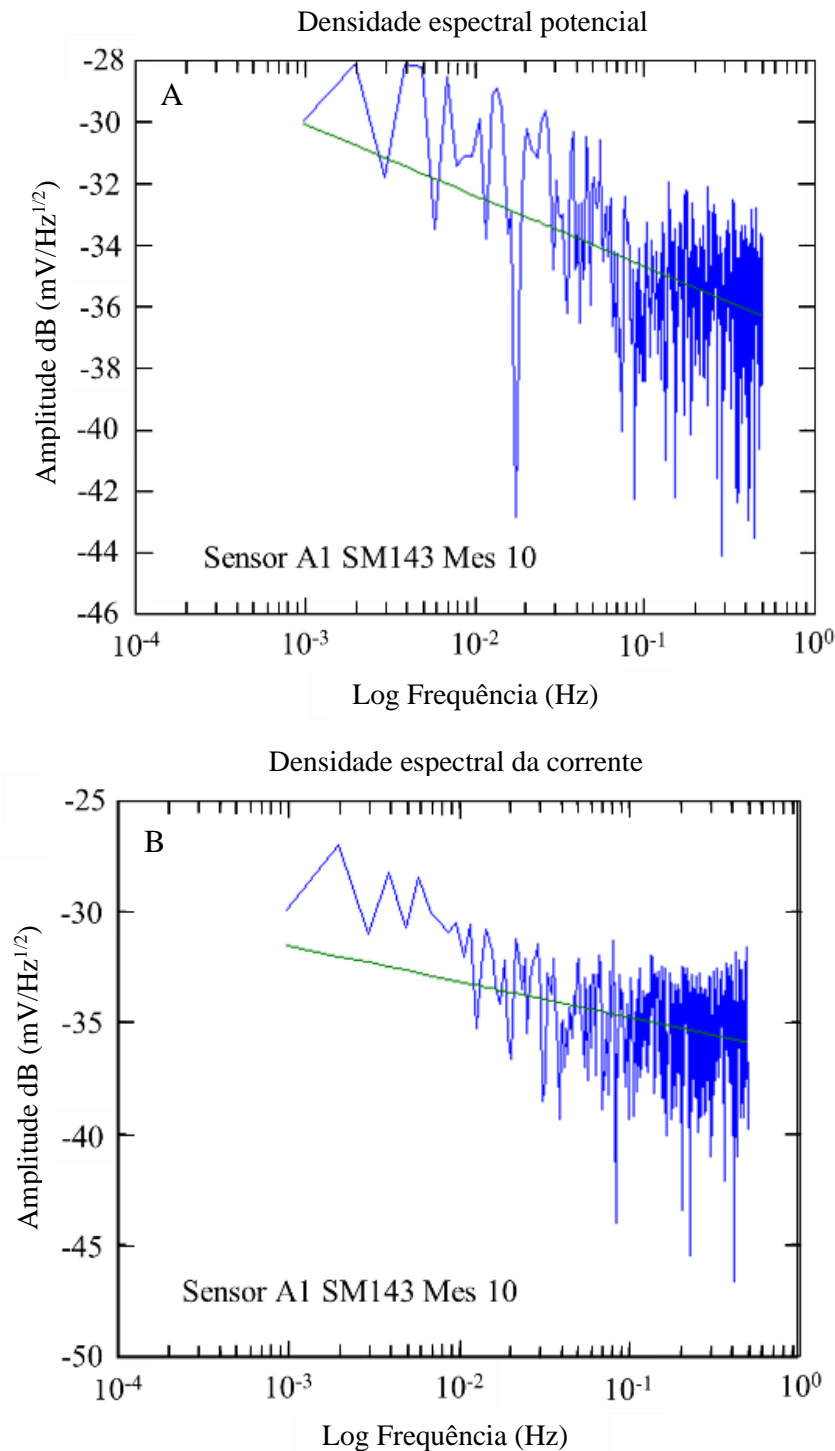


Figura 18. Densidades espectrais de potenciais e correntes ao longo do tempo, obtidas do sensor A1 especificamente em a/c 0,40 após 10 meses de exposição.

Durante os 9 meses de monitoramento dos sensores e da armadura dos corpos de prova de 0,40 a/c, as inclinações obtidas das densidades espectrais potenciais ficaram entre -1,72 e -3,76; enquanto para as amostras de a/c 0,60 ficaram entre -2,06 e -3,48. Da mesma forma, as inclinações dos registros de densidade espectral da corrente das sondas de 0,40 a/c foram -0,63 e -4,92; e para as amostras de a/c 0,60 ficaram entre -0,43 e -3,26. Esses valores em função da inclinação das densidades espectrais de frequência correspondem a um tipo de corrosão uniforme e passivação-

uniforme (Figuras 17 e 18) (Legat e Dolecek, 1995).

Com os registros de ruído eletroquímico dos tubos de ensaio com relação a/c de 0,60 e 0,40, foi realizada uma análise estatística para determinar os dados de resistência, potencial e corrente que permitiram classificar o tipo de corrosão nos ânodos, que estão resumidos na Tabela 6.

Da mesma forma, os valores do índice de localização (LI) (Kelly et al., 1996). obtidos a partir dos registros de ruído eletroquímico dos anodos, para o mês 10 em ambas as qualidades de concreto, indicam os tipos de corrosão generalizada e mista (Tabela 6). Para o mês 18, foi observado um tipo de corrosão mista para ambas as qualidades de concreto, sem ultrapassar um nível maior que a unidade (>1), onde haveria um processo de pite nos sensores.

Tabela 6. Resultados da análise estatística de ruído eletroquímico e interpretação do tipo de corrosão nos ânodos dos concretos de a/c 0,60 e 0,40, para os meses 10 e 18.

relação a/c	Eletrodo - Mês	Rn ($\Omega\text{-cm}^2$)	Índice de localização, IL	tipo de corrosão	PSD potencial (mV)	tipo de corrosão	PSD corrente ($\mu\text{A/cm}^2$)	tipo de corrosão
0,40	A1-10	2,35E+04	0,0058	difundido	-3,76	Uniforme	-1,67	Uniforme
0,40	A2-10	1,92E+04	0,0294	misturado	-3,24	Uniforme	-0,63	passivação uniforme
0,40	AR-10	1,26E+05	0,0878	misturado	-1,72	Uniforme	-4,92	Uniforme
0,60	A1-10	1,50E+04	0,0048	difundido	-2,19	Uniforme	-2,24	Uniforme
0,60	A2-10	1,40E+04	0,0046	difundido	-2,09	Uniforme	-3,03	Uniforme
0,60	AR-10	2,26E+05	0,0406	misturado	-2,06	Uniforme	-0,43	passivação uniforme
0,40	A1-18	1,30E+04	0,0325	misturado	-2,93	Uniforme	-3,98	Uniforme
0,40	A2-18	2,50E+04	0,0175	misturado	-2,00	Uniforme	-1,39	Uniforme
0,40	AR-18	1,26E+05	0,0878	misturado	-1,72	Uniforme	-4,92	Uniforme
0,60	A1-18	1,40E+04	0,0246	misturado	-3,48	Uniforme	-3,26	Uniforme
0,60	A2-18	1,60E+04	0,0469	misturado	-3,38	Uniforme	-2,32	Uniforme
0,60	AR-18	1,40E+04	0,0548	misturado	-2,27	Uniforme	-0,68	passivação uniforme

3.5 Teor de cloretos livres no concreto por peso do cimento

A Tabela 7 mostra os resultados da porcentagem de íons cloreto solúveis em água em relação ao concreto e cimento, para os corpos de prova de concreto com relação a/c de 0,40 e 0,60. Onde pode-se observar que para ambos os tipos de concreto expostos em AP, as quantidades de íons cloreto foram desprezíveis. No caso dos corpos de prova de 0,40 a/c expostos à solução de NaCl a 5%, as porcentagens de íons cloreto foram menores do que nas vigas de 0,60 a/c, esta atingindo um valor de 0,44% de Cl^- em relação ao cimento. Esse valor pode ser considerado um risco iminente de corrosão, de acordo com os valores relatados na literatura (Mohammed e Hamada, 2001; Alonso, 2001), Tabela 8; e pelos valores das tensões e correntes das macrocélulas que foram monitoradas neste trabalho, onde aos 10 meses apresentam valores de alta probabilidade de corrosão.

Tabela 7. Teor de íons cloreto solúveis em água de ambas as dosagens de concreto

Mistura	% Cl em relação ao concreto		% Cl em relação ao cimento	
	em água potável	Em salmoura	em água potável	Em salmoura
a/c: 0,40	0,0000	0,0470	0,00	0,21
a/c: 0,60	0,0035	0,0650	0,02	0,44

Tabela 8. Íons de cloreto livres (Cl⁻) em peso de cimento

Referências	% Cl em relação ao cimento
ACI 318	< ou = 0,15
ACI 222R	0,20
Marrom, 1980 Maomé e Hamada 2001	0,40
Outros	0,10-0,60

3.6 Ensaio de compressão simples

A Tabela 9 mostra os valores médios da resistência à compressão de três corpos de prova cilíndricos de concreto, para cada relação a/c de 0,40 e 0,60. Esses valores de tensão obtidos são relativamente altos, o que está relacionado a um processo de corrosão lento apesar de estar em um ambiente agressivo em solução de NaCl a 5%. Esses resultados permitem corroborar que os concretos feitos com as especificações padrão garantem boa qualidade e são menos vulneráveis à entrada de agentes agressivos.

Tabela 9. Resultados do ensaio de compressão simples

relação a/c	f'c = kg/cm ²
0,40	476
0,60	358

4. CONCLUSÕES

Através de sensores galvânicos é possível monitorar e avaliar o estado de risco devido à corrosão em estruturas de concreto armado, pois as tensões das macrocélulas do sensor galvânico interno (aço carbono/aço inoxidável) apresentaram uma boa correlação com relação aos potenciais de corrosão sensor Cu/CuSO₄, durante o tempo de ensaio do sistema.

Os sensores galvânicos podem ser considerados para sua implementação como método preventivo em correlação com as técnicas eletroquímicas existentes, pois foram observados valores limite de corrente e densidade de corrente semelhantes a outros sistemas similares.

O comportamento do eletrodo de referência de aço inoxidável (cátodo “C”), embutido no concreto armado, geralmente manteve sua estabilidade frente ao risco de corrosão por íons cloreto durante a etapa de avaliação.

O valor de cloretos livres encontrado próximo ao sensor aos 10 meses atingiu um percentual de 0,44% em relação ao cimento, o que representa um risco com probabilidade suficiente para a ativação de corrosão na armadura, sendo este diagnóstico compatível com a tensão da macrocélula e medidas atuais, e por valores próximos aos relatados na literatura.

As informações obtidas com a técnica de ruído eletroquímico mostram que os corpos de prova apresentam corrosão uniforme e/ou mista na armadura e nos sensores devido à passivação do sistema durante a formação dos óxidos, no tempo de exposição; exceto para o corpo de prova de qualidade inferior, que apresenta maiores sinais de corrosão nos meses 17 e 18, mas ainda não apresenta corrosão localizada.

5. REFERÊNCIAS

- AISI. (1983), *AISI – SAE Standard carbon steels. Steel products manual*, American Iron and Steel Institute.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P. (2001), *Reply to the discussion by T.U. Mohammed and H. Hamada of the paper: Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research. 31(5):39-840. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00486-0](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00486-0)
- Alonso, C., Andrade, C., García, A. M. (1990), *Oxygen availability in the corrosion of reinforcements*. Advances in Cement Research. 3(11):127-132. DOI: <https://doi.org/10.1680/adcr.1990.3.11.127>
- Alonso, C., Andrade, C., Nóvoa, X. R., Izquierdo, M., Pérez, M. C. (1998), *Effect of protective oxide scales in the macrogalvanic behaviour of concrete reinforcements*. Corrosion Science. 40(8):1379–1389. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00040-7)
- American Concrete Institute (2002), *ACI 211.1: Recommended practice for selecting proportions for normal weight concrete*, p. 953. Retrieved from <https://doi.org/10.14359/7325>
- Arya, C., Vassie, O. (1995), *Influence of cathode-to-anode area ratio and separation distance on galvanic corrosion currents of steel in concrete containing chlorides*. Cement and Concrete Research. 25(5):989-998. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00094-s](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00094-s)
- ASTM International. (2010). *ASTM D 1411-04 Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/d1411-04>
- ASTM International. (2016). *ASTM C 876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/c0876>
- ASTM International. (2017). *ASTM C 39-17 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/c0039_c0039m-05e02
- Dawson, J. L. (1996). Electrochemical noise measurement. In: Kearns, J. R., Scull J. R. “*Electrochemical noise measurement for corrosion applications*”, ASTM STP 1277. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, p. 3. DOI: <https://doi.org/10.1520/stp37949s>
- Elsener, B. (2002). *Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring*. Cement and Concrete Composites. 24(1):65-72. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00027-0](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00027-0)
- Hudok, D. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. In: “Metals handbook”, 1, E.U., pp. 200-211.
- Kelly R.G., Inman, M.E., Hudson, J.L. (1996), *Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions*. In: Kearns, J. R., Scully, J. R. “*Electrochemical noise measurement for corrosion applications*”. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, pp. 101-113. DOI: <https://doi.org/10.1520/stp37954s>
- Legat, A., Dolecek, V. (1995), *Corrosion Monitoring System Based on Measurement and Analysis of Electrochemical Noise*. Corrosion Science. 51(4): 295-300. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3293594>
- Llorens, M., Serrano, Á., Valcuende, M. (2019), *Sensors for Determining the Durability of Reinforced Concrete Constructions*. Revista Ingeniería de Construcción. 34(1): 81-98. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732019000100081>
- McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Butler, A., Basheer, P. A. M. (2001), *Near-Surface Sensors for Condition Monitoring of Cover-Zone Concrete*. Construction and Building Materials. 15(2-3): 115-124. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(00\)00060-x](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(00)00060-x)
- McCarter, W. J., Vennesland, Ø. (2004), *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials. 18(6):51-358.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.008>

Mohammed, T. U., Hamada, H. (2001), *A discussion of the paper: Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar* by C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, and P. Castro. *Cement and Concrete Research*. 31(5): 835-838.

DOI: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00485-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00485-9)

NMX C155. (2014). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Dosificado en masa – Especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: ONNCCE.

NMX C159. (2004). *Industria de la construcción -Concreto -Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*. Ciudad de México: ONNCCE.

NMX C414. (2004). *Industria de la construcción -Cementos hidráulicos -Especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México: ONNCCE

PROCEDIMIENTO LAQ03. (2005), *Determinación del contenido de Al, C, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Si, Ti y Zn, de aceros al carbono y aceros inoxidables por ICP-AAE y CHNS-O*. CIMAV-EMA, BAJO NORMA ISO/IEC-17025-2005, México.

Raupach, M. (1996), *Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences*. *Construction and Building Materials*. 10(5): 329-338.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00018-6)

Raupach, M., Dauberschmidt, C. (2003), “*Durability of marine structures made of high-performance concrete*”. In: RILEM Proceedings, PRO 32 International Conference on Advances in Concrete and Structures, 2, pp. 919-930. ISBN: 2-912143-41-1. e-ISBN: 2351580176

Raupach, M., Schießl, P. (2001), *Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures*. *NDT & E International*. 34(6):435-442.

DOI: [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(01)00011-1)

Schiessl, P., Raupach, M. (1992), *Monitoring system for the corrosion risk of steel in concrete structures*. *Concrete International*. 14(7):52-55.

Zinc-Taek, P., Yoon-Seok, C., Jung-Gu, K., Lun, C. (2005), *Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of steel embedded in concrete structure*. *Cement and Concrete Research*. 35(9): 1814-1819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.027>

Avaliação da influência da corrosão na estabilidade global de colunas em concreto armado

M. F. Santos¹ , D. P. Santos^{2*} 

* Autor de Contato: daniло.pereira@engenharia.ufjf.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.592>

Recepção: 01/03/2022 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

Este trabalho analisa o impacto da corrosão na estabilidade global de colunas em concreto armado, avaliando a eficácia dos critérios de redução de rigidez propostos pela ABNT NBR 6118:2014. A partir das análises, utilizando-se modelos em elementos finitos que reproduzam o comportamento dos materiais, definiu-se que a corrosão causa a intensificação dos esforços globais de segunda ordem na estrutura. Entretanto, em situações críticas, a perda de equilíbrio na seção transversal conduziu à falha estrutural antes mesmo da perda de estabilidade. O estudo foi realizado tanto por meio de uma análise não-linear geométrica, quanto pela aplicação do coeficiente γ_z , onde concluiu-se que a posterior adição de efeitos reológicos pode conduzir a uma configuração que ultrapasse os limites propostos pela norma brasileira.

Palavras-chave: concreto; corrosão; estabilidade global; efeitos de segunda ordem.

Citar como: Santos, M. F., Santos, D. P. (2022), “Avaliação da influência da corrosão na estabilidade global de colunas em concreto armado”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 401 – 422, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.592>

¹ Fundação Hermínio Ometto (FHO | Uniararas), Araras, Brasil.

² Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, M. F. Santos contribuiu com as atividades de desenvolvimento do modelo numérico, resultados e discussão, redação e preparação do texto original; D. P. Santos contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento do modelo numérico, resultados e discussão, redação e preparação do texto original.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Evaluation of the influence of corrosion on the global stability of reinforced concrete columns

ABSTRACT

This paper analyzes the impact of corrosion on the global stability of reinforced concrete columns, evaluating the effectiveness of the stiffness reduction criteria proposed by ABNT NBR 6118:2014. It was defined through finite element models that corrosion causes the intensification of the second-order effects. However, in critical situations, the failure in the transversal section led to structural collapse even before the stability loss. The study was conducted through nonlinear geometric analyses and applying the γ_z coefficient. It was concluded that the subsequent addition of rheological effects could exceed the limits proposed by the ABNT NBR 6118:2014.

Keywords: concrete; corrosion; global stability; second-order effects.

Evaluación de la influencia de la corrosión en la estabilidad global de las columnas de hormigón armado

RESUMEN

Este trabajo analiza el impacto de la corrosión en la estabilidad global de las columnas de hormigón armado, evaluando la efectividad de los criterios de reducción de rigidez propuestos por la ABNT NBR 6118: 2014. Con los análisis, utilizando modelos de elementos finitos que reproducían el comportamiento de los materiales, se definió que la corrosión provoca la intensificación de los esfuerzos globales de segundo orden en la estructura. Sin embargo, en situaciones críticas, la pérdida de equilibrio en la sección transversal resultó en una falla estructural incluso antes de la pérdida de la estabilidad. El estudio se llevó a cabo tanto a través de un análisis geométrico no lineal como mediante la aplicación del coeficiente γ_z , donde se concluyó que la posterior adición de efectos reológicos puede conducir a una configuración que va más allá de los límites propuestos por la norma brasileña.

Palabras clave: hormigón; corrosión; estabilidad global; efectos de segundo orden.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva entre o material e o meio em que se encontra, desencadeada por ações eletroquímicas, químicas, físicas ou pela união destas, constantemente provocada pela ação de cloretos ou pelo desenvolvimento de fissuras. A presença da corrosão em regiões com tensões de tração é a situação mais gravosa, já que pode ocasionar a ruptura frágil da seção sem que ocorra deformação prévia da estrutura (Helene, 1993; Schwartzman et.al., 2010).

As armaduras de aço dispostas no concreto se encontram protegidas por uma película de óxido de ferro que se forma na superfície do metal devido à alcalinidade do concreto, garantindo sua passivação. Entretanto, esta película pode ter sua integridade comprometida com a redução do pH para abaixo de nove, resultado da carbonatação do concreto na camada de cobrimento, que ocorre devido à presença de íons cloreto, em taxas críticas de poluição atmosférica ou com a lixiviação do concreto, podendo ser intensificados por condições adversas do meio, tipo ou idade da construção (Maldonado-Bandala et. al., 2018; Araujo et. al., 2020; Silvestro et. al., 2020).

O emprego de espessuras inadequadas no cobrimento, devido a erros de projeto ou de execução, pode comprometer a proteção necessária para manter a integridade das barras de aço (Fusco, 2008; Malheiro et. al., 2014; Felix e Carrazedo, 2021). Além disso, a escolha do cimento, aditivos e adições pode mitigar ou intensificar o potencial corrosivo (Silva et. al., 2015; Trevisol et. al., 2017; Dietrich et. al., 2017; Teixeira et. al., 2021).

A corrosão do aço resulta em um hidróxido fraco, pulverulento, sem aderência ou coesão denominado ferrugem, que aumenta seu volume à medida que se forma e pode chegar a ter de oito a dez vezes o volume de aço do qual se originou. As partículas que enferrujam pressionam o concreto ao redor, desencadeando a degradação da estrutura. (Verçoza, 1991; Balestra et. al., 2018). Diversos estudos procuram reproduzir as condições de deterioração em laboratório por meio de ensaios acelerados (Meira e Ferreira, 2019), outros procuram investigar o impacto que diferentes adições têm sobre o concreto no que diz respeito ao seu potencial corrosivo (Amorim Júnior et. al., 2021; Santos et. al., 2020; Blanco et. al., 2019; Figueiredo et. al., 2014). Tais esforços se tornam cada vez mais necessários, uma vez que a estimativa do início deste século apontou que até 3,5% do produto interno bruto de um país desenvolvido é reinvestido para contornar os efeitos da degradação por corrosão (Mackechnie e Alexander, 2001). Diante disso, são crescentes os investimentos em modelos matemáticos que possam descrever a degradação estrutural ocasionada pela corrosão.

Pesquisas recentes têm explorado a simulação numérica da difusão de cloretos em concreto, como os trabalhos de Ayinde et. al. (2017) e de Souza e Leonel (2021), ou por meio de análises de confiabilidade baseadas em modelos probabilísticos (Felix et. al., 2020; Ramos e Carrazedo, 2021; Favretto et. al., 2021). Outras aplicações utilizam o método dos elementos finitos, como a proposta por Ramos e Carrazedo (2020), que desenvolveram modelos capazes de descrever as diferentes fases do concreto armado e a propagação do dano causado pelo processo corrosivo.

Portanto, o presente trabalho busca contribuir com esta área do conhecimento, adicionando ao problema a avaliação da estabilidade global de uma estrutura degradada. Para isso, reproduziu-se numericamente o comportamento mecânico do concreto, bem como a evolução do dano quando este está submetido a cargas externas e à corrosão das armaduras. Tal modelo foi construído com a aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), conforme discutido ao longo do trabalho.

2. PROCEDIMENTO

O uso de simulações numéricas para a previsão do comportamento de estruturas em concreto armado, na presença do dano, exige a reprodução satisfatória do comportamento mecânico dos

materiais constituintes frente solicitações externas. Para isso, foram definidos modelos constitutivos que caracterizam os materiais nas análises realizadas. Nesta seção serão descritos todos os parâmetros utilizados para simular o comportamento mecânico do concreto armado, tal como a validação dos modelos constitutivos utilizados.

2.1 Modelos constitutivos dos materiais

Materiais que reproduzem o comportamento do aço e do concreto foram adicionados aos elementos modelados, contendo características como a densidade, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

No caso do concreto, por conta do desenvolvimento natural de fissuras, se fez necessário a adição de mais informações para que o material reproduzisse fielmente o seu comportamento à tração, compressão, acúmulo de deformações inelásticas e dano.

Os modelos constitutivos empregados aos materiais, concreto e aço, foram extraídos do código europeu CEB-FIB (2010). Assim, o intuito principal desta etapa é a reprodução do comportamento mecânico do concreto armado, de sua curva tensão x deformação, incluindo a influência da aplicação de um modelo de dano.

2.1.1 Modelo constitutivo do aço

O modelo constitutivo empregado ao aço caracteriza o seu comportamento na presença de tensões de tração, representado no diagrama da Figura 1, ou compressão. O primeiro trecho representa a resposta linear do material até que o valor característico da resistência ao escoamento do aço em tração (f_{yk}) seja atingido, seguido de um segundo trecho linear que corresponde ao seu escoamento com encruamento até atingir o valor característico da resistência à tração do aço (f_{tk}), que ocorre no valor característico de deformação máxima (ϵ_{uk}).

As tensões no aço (σ_s) foram obtidas por meio da Equação (1), com os valores do módulo de elasticidade do aço (E_s) e da deformação do aço (ϵ_s).

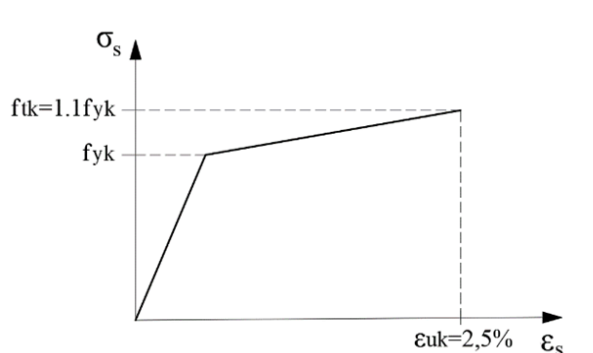


Figura 1. Diagrama tensão x deformação do aço tracionado (Adaptado de CEB-FIB, 2010)

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s$$

onde: $E_s = 200GPa$, se $\epsilon_s \leq 0,207\%$ (1)
 $E_s = 2,2GPa$, se $\epsilon_s > 0,207\%$

2.1.2 Modelo constitutivo do concreto

O modelo constitutivo utilizado no concreto caracteriza o seu comportamento frente solicitações de compressão (Figura 2), e tração (Figura 3 e Figura 4).

Quando comprimido, o concreto apresenta um comportamento elástico até atingir o seu valor médio de resistência à compressão (f_{cm}), passando a perder rigidez. A partir deste ponto, o desenvolvimento de microfissuras causa o amolecimento do material, representado no trecho decrescente do diagrama.

O concreto tracionado apresenta um comportamento elástico linear até atingir a deformação de tração do concreto (ϵ_{ct}) de 0,15%. Em aproximadamente 90% do valor médio da resistência à tração axial do concreto (f_{ctm}), o desenvolvimento de microfissuras causa a diminuição da rigidez do

material, caracterizando uma zona de fissuração. Em tensões próximas ao f_{ctm} o quadro se intensifica, uma vez que ocorre a evolução das fissuras. A partir desse ponto, o material sofre uma redução drástica em sua rigidez.

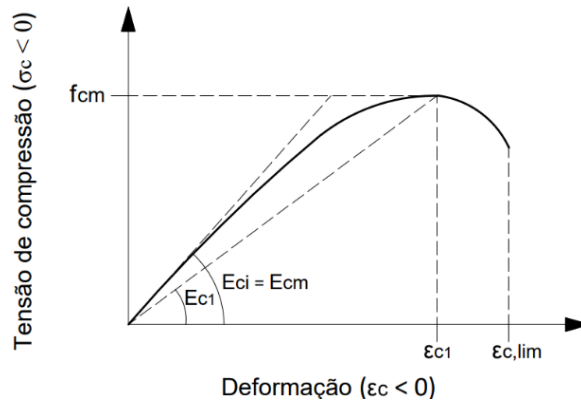


Figura 2. Diagrama tensão x deformação do concreto comprimido (Adaptado de CEB-FIB, 2010)

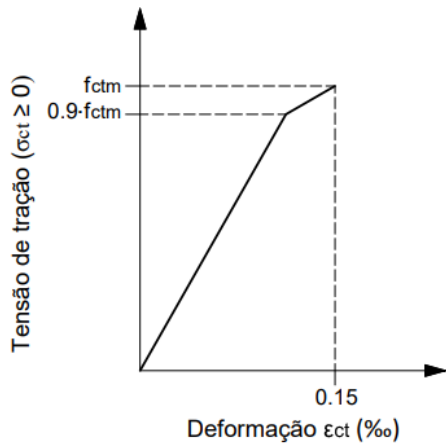


Figura 3. Diagrama tensão x deformação do concreto tracionado no regime elástico (Adaptado de CEB-FIB, 2010)

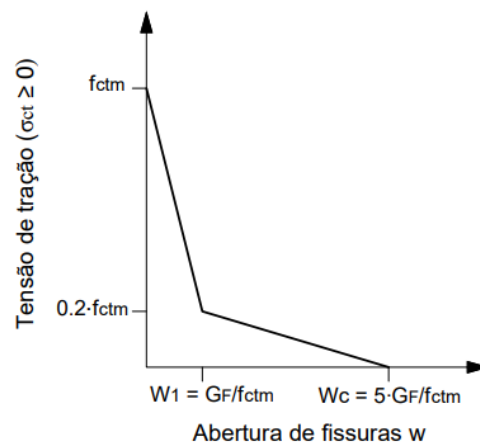


Figura 4. Diagrama tensão x abertura de fissuras na zona de fratura (Adaptado de CEB-FIB, 2010)

O f_{cm} foi definido por meio da Equação (2), a partir do valor característico da resistência à compressão do concreto (f_{ck}) e do valor padronizado que representa a diferença entre a resistência média do concreto e a sua resistência característica (Δ_f).

O módulo secante desde a origem até o pico da tensão compressiva (E_{c1}) foi definido utilizando-se a Equação (3). Nesta equação tem-se as deformações de compressão do concreto (ϵ_c), variando de zero à deformação final em compressão ($\epsilon_{c,lim}$) de 3,5‰, e a deformação de compressão máxima (ϵ_{c1}), esta última obtida por meio dos valores tabelados que constam no CEB-FIB (2010).

A Equação (4) foi utilizada para determinar o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias (E_{ci}), que depende do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{c0}), do parâmetro em função da natureza do agregado (α_E) e do valor padronizado (Δ_f), definidos por consulta ao CEB-FIB (2010).

O valor da razão entre as deformações (η) e da constante de plasticidade (k) foram definidos por meio da Equação (5) e Equação (6), respectivamente. Por fim, utilizou-se a Equação (7) para calcular os valores de tensão de compressão do concreto (σ_c) e obter a lei tensão x deformação apresentada no diagrama da Figura 2.

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (5)$$

$$E_{c1} = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c1}} \quad (3)$$

$$k = \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \quad (6)$$

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \right) \cdot f_{cm} \quad (7)$$

A resistência à tração axial do concreto (f_{ctm}) foi definida através da Equação (8) e Equação (9), de acordo com o seu f_{ck} .

Na zona de fratura as tensões e deformações estão relacionadas a uma abertura de fissuras fictícia (w), sendo seus valores em pontos específicos, (w_l) e (w_c), obtidos por meio da Equação (10) e Equação (11), respectivamente. Finalmente, a energia de fratura (G_F) foi obtida por meio da Equação (12).

Vale salientar que apenas o conhecimento da abertura de fissuras em função da energia de fratura não se mostra suficiente para muitas aplicações. Sendo assim, Aitsin et. al. (2008) trazem a definição do comprimento característico (l_{ch}), um valor útil para a avaliação da abertura de fissuras quanto à deformação. Esta grandeza é obtida a partir da Equação (13).

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \text{ para } f_{ck} \leq 50MPa \quad (8)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot (f_{ck} + \Delta f)) \text{ para } f_{ck} > 50MPa \quad (10)$$

$$w_l = \frac{G_F}{f_{ctm}} \text{ quando } \sigma_t = 0,20 \cdot f_{ctm} \quad (12)$$

$$w_c = 5 \cdot \frac{G_F}{f_{ctm}} \text{ quando } \sigma_t = 0 \quad (9)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0,18} \quad (11)$$

$$l_{ch} = \frac{E_{ci} \cdot G_F}{f_{ctm}^2} \quad (13)$$

As deformações específicas (ε_t) tiveram seus valores variando de zero ao valor final da abertura de fissuras fictícia (w_c), convertido a partir da razão entre w_c e l_{ch} . Os valores de tensão de tração (σ_t) foram definidos até uma deformação de 0,15‰ por meio da Equação (14) e Equação (15), de acordo com o f_{ctm} . Na zona de fratura, os valores de σ_t foram determinados utilizando-se a Equação (16) e Equação (17), em um intervalo variando de 0,15‰ a w_c .

$$\sigma_t = E_{ci} \cdot \varepsilon_t \text{ para } \sigma_t \leq 0,9 \cdot f_{ctm} \quad (14)$$

$$\sigma_t = f_{ctm} \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{0,00015 - \varepsilon_t}{0,00015 - 0,9 \cdot f_{ctm} / E_{ci}} \right) \text{ para } 0,9 \cdot f_{ctm} < \sigma_t \leq f_{ctm} \quad (15)$$

$$\sigma_t = f_{ctm} \cdot \left(1 - 0,8 \cdot \frac{w}{w_l} \right) \text{ para } w \leq w_l \quad (16)$$

$$\sigma_t = f_{ctm} \cdot \left(0,25 - 0,05 \cdot \frac{w}{w_l} \right) \text{ para } w_l < w \leq w_c \quad (17)$$

Ao concluir os cálculos, os valores de σ_c e σ_t foram adicionados ao modelo de dano aplicado ao material que representa o concreto nas simulações numéricas realizadas.

2.1.2.1 Modelo de dano aplicado ao concreto

O modelo adotado para o concreto foi o *Concrete Damage Plasticity* (CDP), um modelo de dano com plastificação desenvolvido por Lubliner et. al. (1989) e aperfeiçoado por Lee e Fenves (1998). Tal modelo está implementado e disponível no software Abaqus®.

Para este modelo de material, o comportamento na presença do dano se encontra representado nos

diagramas da Figura 5 e Figura 6 e é matematicamente descrito pelas leis tensão x deformação indicadas na Equação (18), para a compressão, e Equação (19), para a tração, propostas por Hibbitt et. al. (2011).

Tanto na tração quanto na compressão, enquanto íntegro, o concreto apresenta uma conservação em seu módulo de elasticidade inicial (E_0). Ao se atingir a tensão máxima na tração (σ_{tu}) ou na compressão (σ_{cu}), inicia-se o processo de degeneração deste módulo de elasticidade à medida que são incrementadas as variáveis de dano d_t (tração) e d_c (compressão). As deformações plásticas à tração ε_t^{pl} e à compressão ε_c^{pl} incorporam a plastificação ao modelo.

As variáveis de dano d_c e d_t foram obtidas por meio da Equação (20) e Equação (21), respectivamente, propostas por Yu et. al. (2010), com os valores de σ_c , σ_t , f_{cm} e f_{ctm} já definidos anteriormente.

Por fim, os valores das variáveis de dano d_c e d_t , obtidos com os cálculos, foram adicionados ao modelo de dano do concreto.

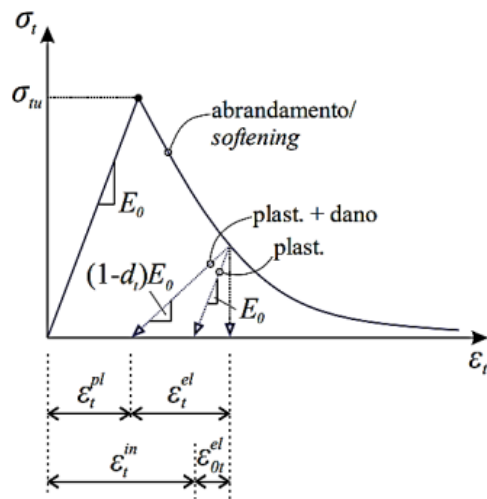


Figura 5. Relação tensão x deformação para o concreto na tração (Extraído de Reginato, 2020)

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (18)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (20)$$

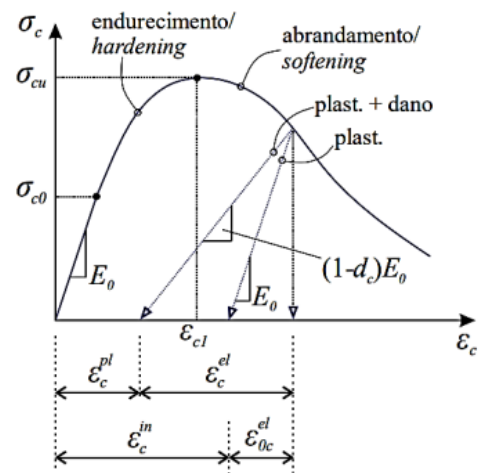


Figura 6. Relação tensão x deformação para o concreto na compressão (Extraído de Reginato, 2020)

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \text{ para } \varepsilon_c \geq \varepsilon_{c1} \quad (19)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ctm}} \text{ para } \varepsilon_t \geq \varepsilon_{tu} \quad (21)$$

2.2 Validação dos modelos constitutivos

A fim de analisar se os modelos constitutivos utilizados na caracterização dos materiais garantem o comportamento esperado, foram realizadas simulações numéricas no *software* Abaqus[®]. Nesta primeira etapa foram realizadas três análises, uma para verificar o comportamento do aço tracionado, em um elemento de barra bidimensional, e as outras duas para verificar o comportamento do concreto tracionado e comprimido, em um elemento sólido bidimensional.

As propriedades elásticas adicionadas aos materiais, como o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν), foram extraídas de Álvares (1993). Além disso, antes que as análises fossem realizadas, as malhas de elementos finitos aplicadas nos modelos passaram por testes de convergência.

Os resultados obtidos com as simulações numéricas foram comparados aos modelos teórico-analíticos propostos no CEB-FIB (2010), estando representados na Figura 7, Figura 8 e Figura 9. Com as análises, foi possível definir que o modelo constitutivo utilizado na modelagem numérica

do aço garantiu o comportamento esperado, apresentando apenas um desvio sutil no início do trecho que representa seu escoamento com encruamento. Quanto ao concreto, as análises permitiram observar que o material numericamente representado simulou satisfatoriamente o comportamento previsto, apresentando apenas variações modestas nas zonas de falha e de fratura.

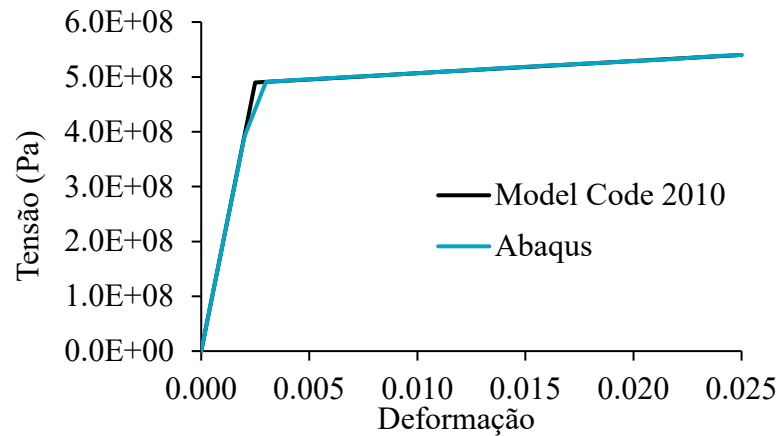


Figura 7. Diagrama comparativo tensão x deformação do aço tracionado

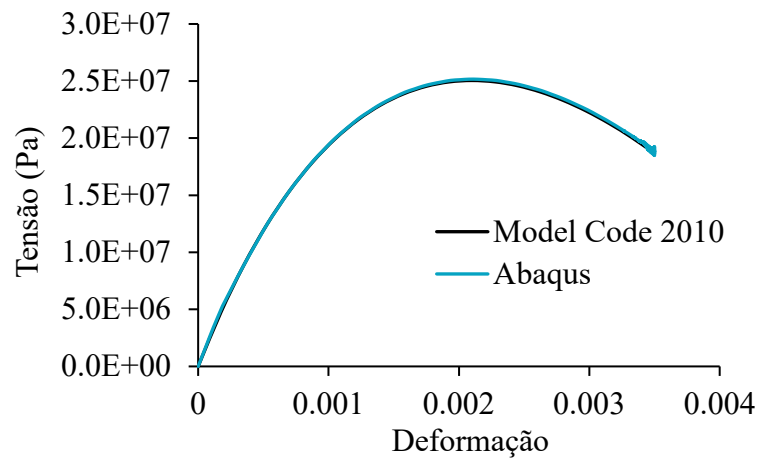


Figura 8. Diagrama comparativo tensão x deformação do concreto comprimido

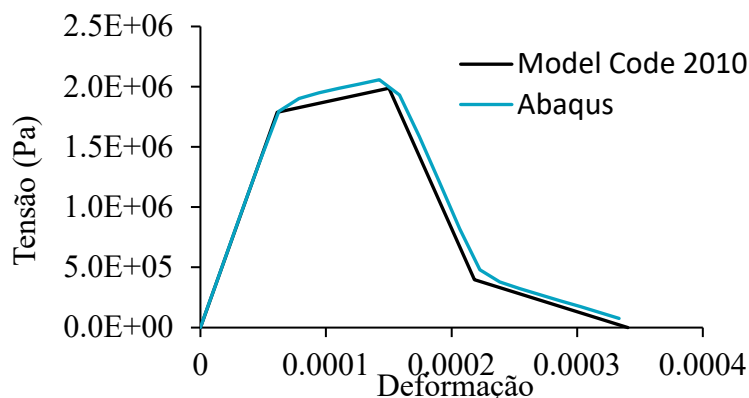


Figura 9. Diagrama comparativo tensão x deformação do concreto tracionado

Os modelos constitutivos validados foram aplicados na simulação numérica não linear de uma viga em concreto armado sujeita à aplicação de cargas. Para isso, foi realizada a modelagem tridimensional, empregando elementos sólidos paralelepípedicos lineares de 8 nós, simulando o

concreto, e elementos de barra tridimensionais em aço, representando os vergalhões e estribos, no *software* Abaqus®. Considerou-se perfeita aderência entre o aço e o concreto, obtida por meio do embutimento das barras de aço no elemento de concreto.

As dimensões, a taxa de armadura, o local da aplicação das cargas na viga e as propriedades elásticas dos materiais, Tabela 1, foram registradas por Álvares (1993). A malha estruturada de elementos finitos aplicada no modelo passou por testes de convergência, por meio da realização de análises lineares iterativas, aumentando-se o número de elementos, até que o deslocamento no centro da viga deixasse de sofrer alterações.

Tabela 1. Propriedades elásticas dos materiais (Adaptado de Álvares, 1993)

Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Young (MPa)
Concreto	0.2	29200
Aço	0.3	196000

A análise foi realizada até um deslocamento de 8 mm no centro da viga, correspondendo a uma carga P de aproximadamente 47 kN. Conforme a aplicação progressiva das cargas era efetuada, sob a forma de deslocamentos prescritos, os deslocamentos no centro da viga foram registrados. Por fim, os resultados foram comparados aos obtidos na análise experimental de Álvares (1993) e ao modelo teórico deduzido pelos autores, a partir das hipóteses de fissuração proposta por Branson (1968). O modelo de Branson (1968) permite a consideração de uma inércia média, que leva em conta os efeitos da fissuração ao longo do vão do elemento estrutural, a partir de uma análise semiprobabilística. Tais comparações se encontram representadas na Figura 10.

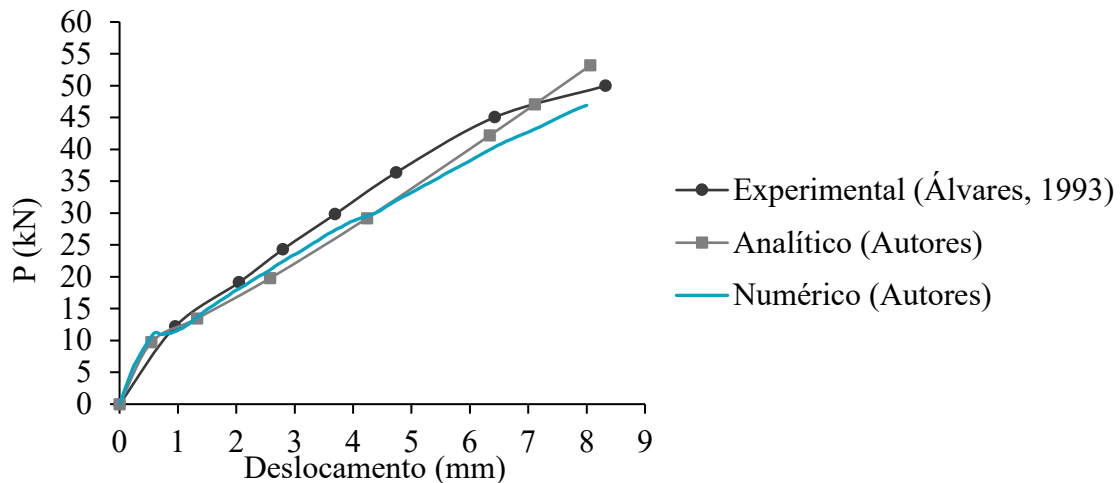


Figura 10. Diagrama comparativo carga x deslocamento das análises

A viga da simulação numérica se comportou de maneira semelhante à análise experimental e ao modelo analítico nos Estádios I e II. Divergências sutis foram observadas, mas se justificam pelas incertezas associadas aos parâmetros de caracterização do concreto. Além disso, há divergências sensíveis entre as condições de contorno adotadas no modelo numérico e aquelas presentes no ensaio experimental.

Com a simulação numérica, foi possível observar também a evolução do dano na estrutura, representada na Figura 11. Houve o desenvolvimento e propagação de fissuras no elemento conforme a aplicação das cargas, até atingir-se um estado elevado de degradação, de maneira muito semelhante à observada por Álvares (1993) em sua análise experimental.

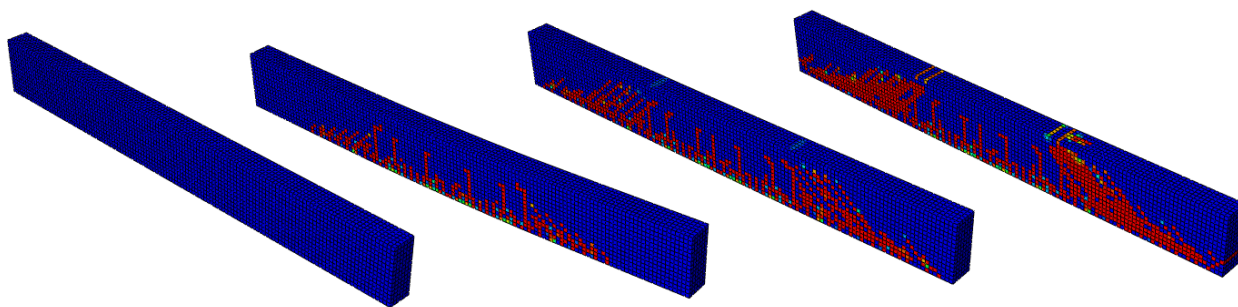


Figura 11. Evolução de fissuras na viga

Após a confirmação da eficiência dos modelos constitutivos aplicados, tal como do modelo de dano utilizado para representar a degradação do concreto, foi realizada a modelagem de uma estrutura no *Software Abaqus*[®], onde a corrosão foi adicionada às análises conforme será discutido nas seções seguintes.

2.3 Modelagem da estrutura sujeita à corrosão

Nesta etapa, serão apresentadas a idealização da estrutura estudada, a estratégia para a simulação numérica da degradação provocada pelo fenômeno da corrosão nas armaduras e a metodologia para a avaliação da estabilidade global. Também serão dadas informações sobre a construção do modelo em elementos finitos de modo a permitir a reprodutibilidade da pesquisa.

2.3.1 Características geométricas da estrutura

A estrutura escolhida para as simulações se baseia na apresentada por Wahrhaftig (2008), Figura 12. Trata-se de uma estrutura de seção vazada e esbelta em concreto armado, utilizada como suporte para um sistema de transmissão telefônica. Embora as dimensões reproduzidas no modelo numérico não sejam as mesmas da estrutura real, guardou-se a proporção quanto ao índice de esbeltez da estrutura. Assim, o elemento estrutural foi modelado com 14 m de altura e se encontra armado com 16 barras de aço de 25 mm, dispostas conforme a Figura 12.

Tanto a estrutura de concreto quanto as barras de aço foram modeladas com elementos sólidos lineares paralelepípedicos de 8 nós. As condições de contorno aplicadas no modelo são compostas por um carregamento vertical pontual de 5 kN, posicionado no topo do elemento, como representação das antenas, e por um engaste, posicionado na base do elemento, ambos adicionados no ponto central da seção. Ademais, as forças horizontais que caracterizam a ação do vento foram adicionadas ao modelo sob a forma de cargas pontuais a cada 1 m da estrutura. Finalmente, o peso próprio foi considerado para uma gravidade de 9,81 m/s, tendo as massas específicas do concreto e do aço, extraídas da ABNT NBR 6120:2019, iguais a 2400 kg/m³ e 7850 kg/m³, respectivamente.

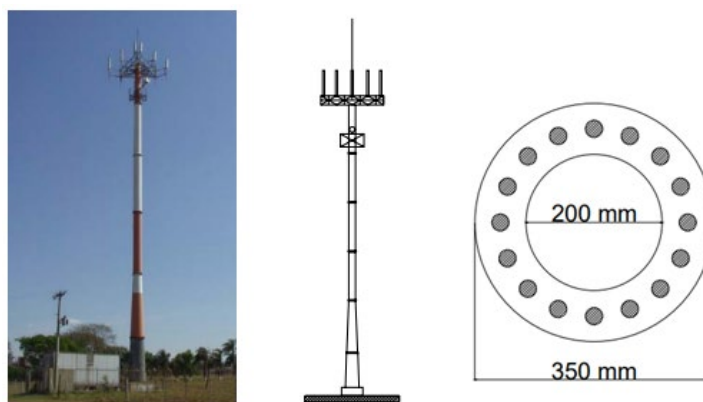


Figura 12. Estrutura real aproximada pelo modelo numérico (Adaptado de Wahrhaftig, 2008)

2.3.2 Estimativa do vento

O vento foi estimado através de equações extraídas da ABNT NBR 6123:1988 e aplicado à estrutura como forças pontuais horizontais, a cada metro, na lateral esquerda do elemento estrutural.

Inicialmente, calculou-se o valor do fator S_2 , que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno, por meio da Equação (22). Com o valor do fator topográfico S_1 , considerando o terreno plano ou fracamente acidentado, do fator S_2 calculado, do fator estatístico S_3 , considerando uma edificação cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva, e da velocidade básica do vento (V_0), definida com base na localização da estrutura. A velocidade básica do vento é uma grandeza necessária para a determinação da velocidade característica do vento, V_k (Equação (23)).

Assim, após estas definições, foi calculada a pressão dinâmica (q), através da Equação (24), tal valor é útil ao cálculo das forças pontuais adicionadas ao modelo.

Portanto, calculou-se a força de arrasto (F_a), Equação (25), com os valores do coeficiente de arrasto (C_a), do fator de redução (K), da distância vertical entre as forças (H) e do diâmetro externo da seção (D). Tais valores de F_a , calculados a cada metro, correspondem à intensidade das forças horizontais aplicadas na estrutura.

$S_2 = b \cdot F_R \cdot Z^p$ <p>onde</p> $b = 1 ; F_R = 1 ; p = 0,085$ <p>Z : altura da aplicação da força em relação ao solo</p> $V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0$ <p>onde</p> $S_1 = 1 ; S_3 = 1,1 ; V_0 = 30 \text{ m/s}$	(22)	$q = 0,613 \cdot V_k^2$ $F_a = C_a \cdot q \cdot K \cdot H \cdot D$ <p>onde</p> $C_a = 0,60 ; K = 1$ <p>H : distância vertical entre as forças</p> <p>D : diâmetro externo da seção</p>	(23)
			(25)

2.3.3 Adição da corrosão

A corrosão foi adicionada ao modelo com o intuito de verificar qual a sua influência na estabilidade da estrutura. A expansão gerada pelos produtos da corrosão foi representada por meio da aplicação de deslocamentos radiais prescritos em extensões pré-estabelecidas do concreto em contato com as barras de aço acometidas pela corrosão, sendo posicionados na região mais afetada pela ação do vento na estrutura. O método utilizado para a definição dos valores dos deslocamentos radiais aplicados foi proposto por El-Maaddawy e Soudki (2007).

A constante de flexibilidade do furo (k) foi obtida por meio da Equação (26). Trata-se de uma constante que relaciona o deslocamento radial com a pressão de corrosão, levando em consideração a zona porosa presente na interface de contato entre o aço e o concreto, que deve ser inicialmente preenchida pelos produtos da corrosão antes que as tensões expansivas geradas comecem a criar pressão sobre o concreto ao redor. Para isso, usou-se os valores do coeficiente de Poisson (ν), do módulo de elasticidade efetivo (E_{ef}), do diâmetro das barras de aço (D), da espessura da zona porosa (δ_0), variando de 10 a 20 μm , e do fator (Ψ) calculado com a Equação (27), que leva em conta o cobrimento de concreto (C).

A pressão radial necessária para produzir deslocamentos no concreto (P_{cor}) foi calculada por meio da Equação (28), onde o valor da porcentagem de perda de massa de aço (m_I) variou de acordo com a classe de resistência do concreto. Por fim, foi possível definir os valores de deslocamento

no concreto (δ_c), necessário para acomodar o aumento de volume decorrente da transformação do aço em ferrugem, por meio da Equação (29).

A porcentagem de perda de massa de aço (m_l) pode ser relacionada com a massa de aço consumida por unidade de comprimento (M_{loss}) por meio da Equação (30), com os valores do diâmetro das barras de aço (D) e da densidade do aço (ρ_s).

$$k = \frac{(1 + \nu + \psi) \cdot (D + 2\delta_0)}{2E_{ef}} \quad (26) \quad \left. \begin{array}{l} \delta_c = k \cdot P_{cor} \quad (27) \\ \left(\frac{M_{loss}}{\rho_s} \right) = \frac{m_l \cdot (\pi D^2)}{400} \quad (29) \end{array} \right\}$$

$$\psi = \frac{(D + 2\delta_0)^2}{2C \cdot (C + D + \delta_0)} \quad (28)$$

$$P_{cor} = \frac{m_l \cdot E_{ef} \cdot D}{90,9 \cdot (1 + \nu + \psi) \cdot (D + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 \cdot E_{ef}}{(1 + \nu + \psi) \cdot (D + 2\delta_0)} \quad (30)$$

2.4 Metodologia para estudo da estabilidade global

Inicialmente, foram realizadas três simulações no software Abaqus[®], com o intuito de verificar a estabilidade da estrutura com diferentes classes de resistência do concreto, variando do C20 ao C50. Foram verificados o valor do deslocamento no topo e do momento na base da estrutura em cada análise realizada.

A primeira etapa consistiu no cálculo do coeficiente γ_z conforme a ABNT NBR 6118:2014, Equação (31), com os valores de deslocamento a cada metro da estrutura, medidos na primeira análise (AN1), ou seja, uma análise elástica e linear com redução do módulo de elasticidade (E) em 20% (em acordo com o item 15.7.3 da ABNT NBR 6118:2014).

O coeficiente γ_z permite avaliar a importância dos esforços de segunda ordem globais na estrutura e sua classificação quanto à deslocabilidade dos nós, sendo considerada uma estrutura de nós fixos aquela cujo valor do γ_z for menor ou igual a 1,1. Tal coeficiente depende do momento de tombamento e da soma dos produtos de todas as forças verticais pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos na análise de 1ª ordem.

Na sequência, a Não Linearidade Geométrica (NLG) foi adicionada ao modelo AN1, dando origem à segunda análise (AN2), onde foi mantida a redução do módulo de elasticidade em 20%.

Com os valores de momento na base, obtidos na primeira e na segunda análise (AN1 e AN2), foi calculado um novo coeficiente γ_z . Desta vez, o $\Delta M_{tot,d}$ utilizado foi a diferença entre o momento obtido na segunda e na primeira análise, enquanto o valor de $M_{1,tot,d}$ foi o do momento da primeira análise (AN1). Este cálculo apenas ratificou a competência do coeficiente γ_z como estimador dos efeitos de segunda ordem.

Finalmente, na terceira análise (AN3), o valor do E foi mantido íntegro e adicionou-se a Não Linearidade Física (NLF) e a NLG ao modelo. O coeficiente γ_z , agora renomeado como γ_{zcalc} , Equação (32), foi calculado e será apresentado nos resultados desta pesquisa.

Nesta etapa, a NLF foi adicionada às simulações por meio dos modelos constitutivos dos materiais e do modelo de dano, em substituição à redução do módulo de elasticidade em 20% dos modelos AN1 e AN2.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (31)$$

Onde

$\Delta M_{tot,d}$ é a soma dos produtos das forças verticais atuantes pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos na análise de 1ª ordem

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento (calculado a partir de uma análise elástica e linear)

$$\gamma_{zcalc} = \frac{M_{2,tot,d}}{M_{1,tot,d}} \quad (32)$$

Onde

$M_{2,tot,d}$ é o momento total calculado a partir de uma análise de 2ª ordem

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento (calculado a partir de uma análise elástica e linear)

Posteriormente, a corrosão foi adicionada ao modelo da terceira análise e foram realizadas mais oito simulações com cada classe de concreto. As primeiras quatro análises foram realizadas em um modelo acometido pela corrosão em três de suas dezesseis barras de aço, em uma extensão de 5 cm (AN4 a AN7). As demais foram realizadas em um modelo com a ação da corrosão em cinco de suas dezesseis barras de aço, em uma extensão de 10 cm (AN8 a AN11).

Em ambos os casos, a corrosão foi adicionada a uma distância de 30 cm da base do elemento, sendo esta próxima a região de momento máximo provocado pela ação do vento. Nesta etapa, o coeficiente γ_{zcalc} foi calculado conforme descrito na Equação (32).

O resumo das análises realizadas se encontra no Quadro 1. Ademais, é importante destacar que em todas as análises foi considerada perfeita a aderência entre o aço e o concreto, com exceção das regiões degradadas pela corrosão.

Salienta-se que informações adicionais a respeito do coeficiente γ_z , incluindo a sua dedução matemática, podem ser consultadas no trabalho de Franco e Vasconcelos (1991).

Quadro 1. Resumo de análises realizadas

Análise	Características	
AN1	Análise linear física e geométrica, com redução de 20% do módulo de elasticidade	LF, LG e 0.8E
AN2	Análise linear física, não linear geométrica, com redução de 20% do módulo de elasticidade	LF, NLG e 0.8E
AN3	Análise não linear física e geométrica, sem redução do módulo de elasticidade	NLF, NLG e E
AN4 a AN11	Análise não linear física e geométrica, sem redução do módulo de elasticidade, com adição da corrosão	NLF, NLG, E e corrosão

2.4.1 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos adicionada ao modelo foi composta por elementos tridimensionais paralelepípedos lineares, portanto, formados por 6 faces e 8 nós.

A convergência da malha aplicada ao modelo foi realizada por meio de simulações iterativas, sem a consideração de não-linearidades, aumentando-se o número de elementos finitos que compõem a malha, até que o valor do deslocamento no topo da estrutura deixasse de sofrer alterações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A corrosão foi adicionada ao modelo gradativamente, de tal maneira que o deslocamento aplicado foi maior em cada simulação realizada com cada classe de resistência do concreto, à medida que se aumentou a porcentagem de corrosão (m_I). A equivalência entre os valores de m_I , do deslocamento radial aplicado no concreto (δ_c) e da massa de aço consumida por unidade de comprimento (M_{loss}) utilizados nas simulações se encontram representados no Tabela 2.

Tabela 2. Resumo de parâmetros utilizados nas simulações

	Análise	C20 e C30			C40 e C50		
		m_I [%]	Deslocamento radial, δ_c [μm]	M_{loss} [g/m]	m_I [%]	Deslocamento radial, δ_c [μm]	M_{loss} [g/m]
3 barras	AN3	0.091	0.00	3.51	0.091	0.00	3.51
	AN4	0.150	8.13	5.79	0.300	28.75	11.57
	AN5	0.200	15.00	7.72	0.350	35.63	13.50
	AN6	0.250	21.88	9.65	0.400	42.51	15.43
	AN7	0.300	28.75	11.57	0.450	49.38	17.36
5 barras	AN3	0.091	0.00	3.51	0.091	0.00	3.51
	AN8	0.105	1.94	4.05	0.125	4.69	4.82
	AN9	0.110	2.63	4.24	0.138	6.41	5.31
	AN10	0.115	3.31	4.44	0.150	8.13	5.79
	AN11	0.120	4.00	4.63	0.163	9.85	6.27

Com as simulações, foi possível verificar que os dois parâmetros analisados, deslocamento no topo e momento na base da estrutura, aumentaram conforme o incremento de m_I , demonstrando que a evolução da corrosão nas armaduras gera uma redução na rigidez da estrutura, causando a intensificação de suas reações por ocasião do incremento dos esforços de segunda ordem. Os valores dos momentos na base da estrutura, obtidos com as simulações, se encontram representados na Figura 13.

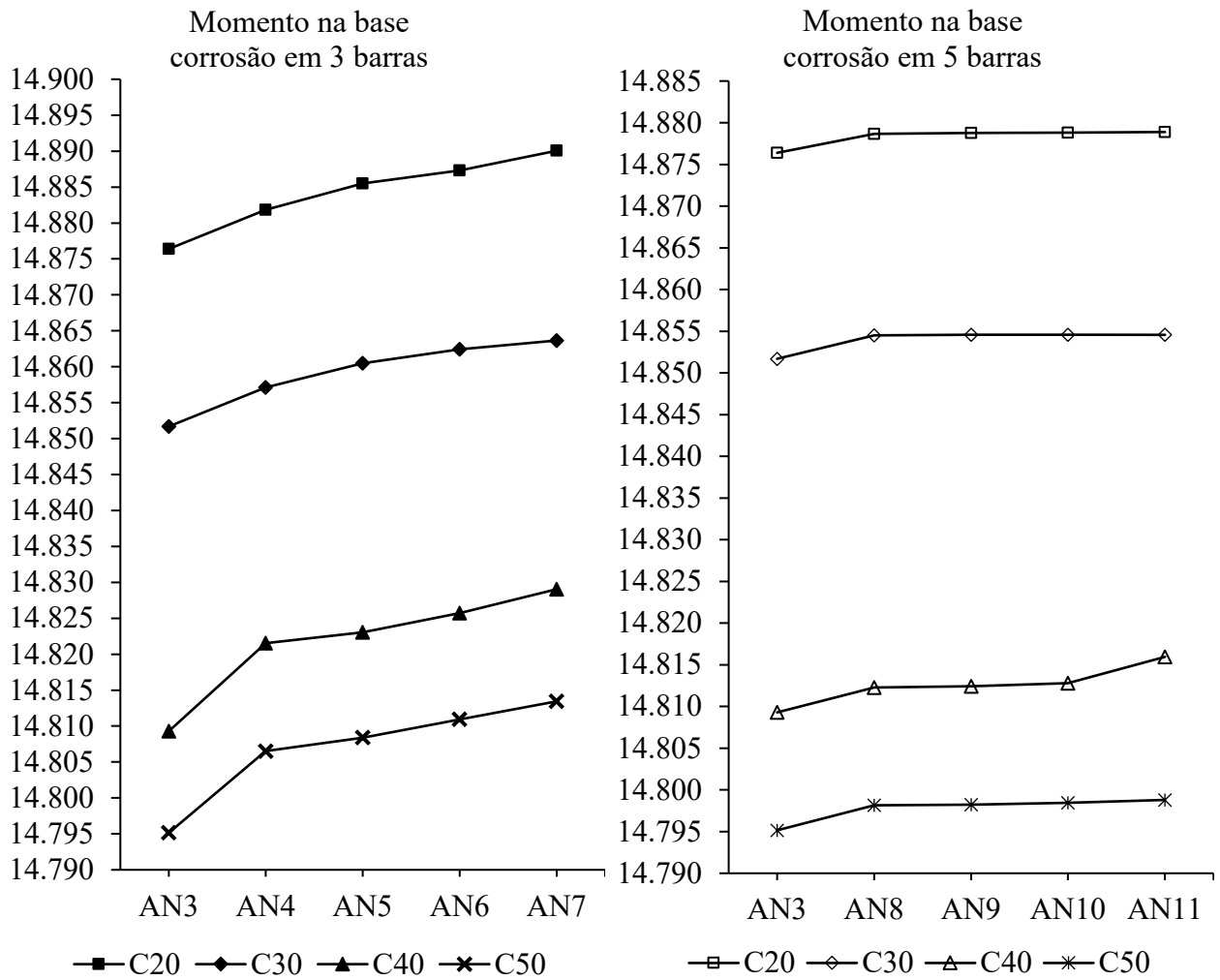


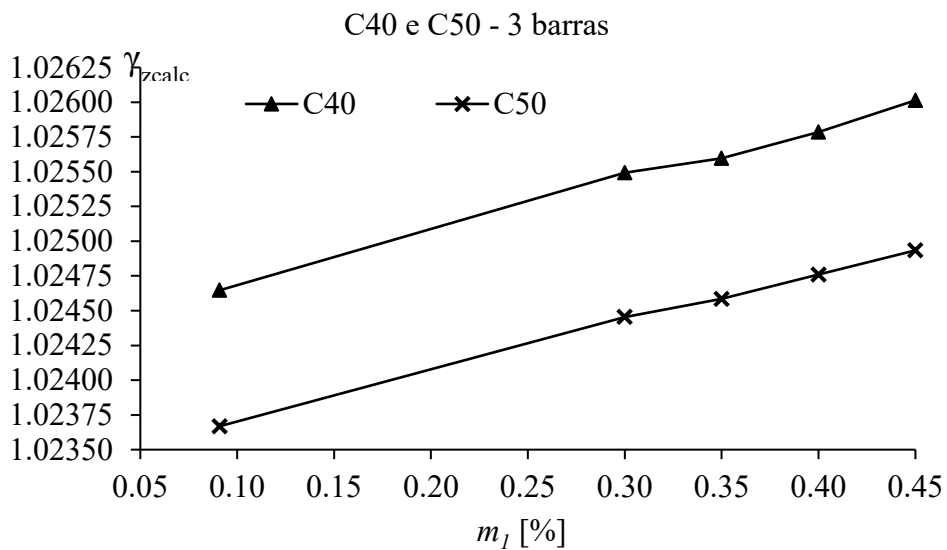
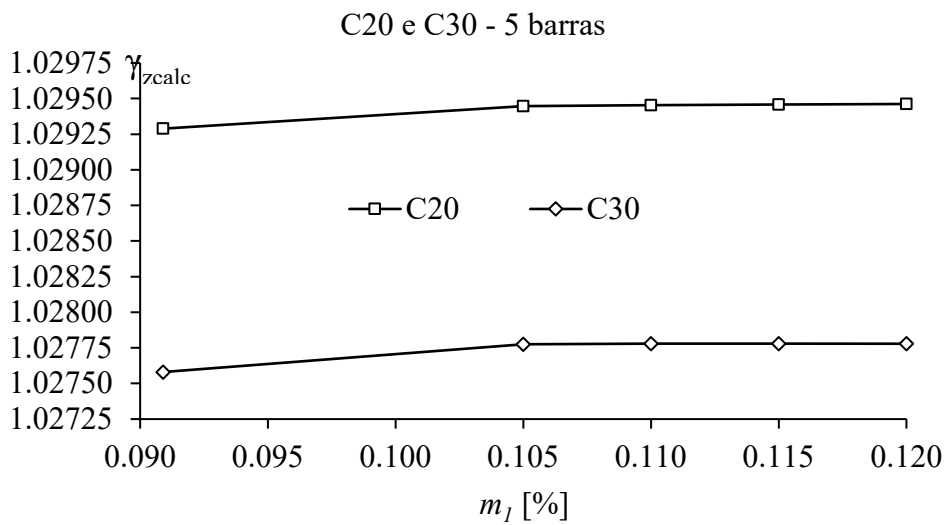
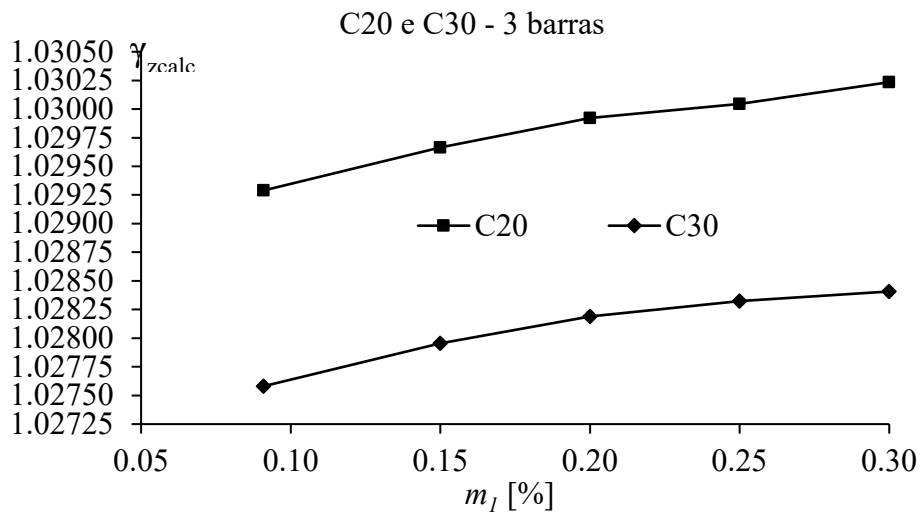
Figura 13. Valores de momento na base da estrutura para as análises estudadas

A Tabela 3 traz os valores calculados de γ_{zcalc} para as simulações AN1, AN3 e para as simulações AN7, realizadas após a adição da corrosão, considerando todas as classes de concreto analisadas. Os valores apresentados para as simulações com a adição da corrosão foram os obtidos aplicando-a em 3 barras de aço do modelo, por atingir valores superiores de γ_{zcalc} quando comparados à aplicação em 5 barras.

Tabela 3. Coeficiente γ_{zcalc}

Classe do concreto	AN3	AN7	AN1 (NBR 6118:2014)	Relação entre AN7 e AN1 [%]
C20	1.0293	1.0302	1.0348	99.56
C30	1.0276	1.0284	1.0330	99.56
C40	1.0246	1.0260	1.0298	99.63
C50	1.0237	1.0249	1.0287	99.63

Os valores calculados dos coeficientes γ_{zcalc} se encontram relacionados com os valores de m_1 na Figura 14. É possível observar que em todas as classes de resistência do concreto, em ambas as situações de corrosão propostas, o γ_{zcalc} aumenta conforme o aumento de m_1 e, conseqüentemente, do deslocamento radial provocado pela corrosão, δ_c .



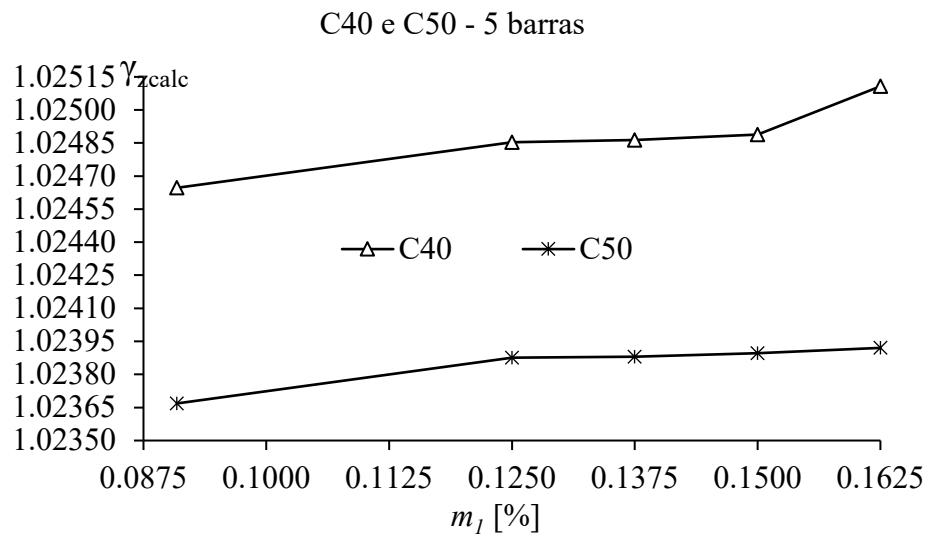


Figura 14. Relação entre m_l e o coeficiente γ_{zcalc}

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 14, constata-se que a adição da corrosão à simulação gerou um aumento no valor do coeficiente γ_{zcalc} em todas as classes de resistência do concreto analisadas. Tendo em vista que o γ_{zcalc} pode ser adaptado para um coeficiente de majoração dos esforços globais de 1ª ordem, provenientes dos carregamentos horizontais, é possível definir que a adição da corrosão causou a intensificação dos esforços globais de 2ª ordem na estrutura.

Ao relacionar os valores de γ_{zcalc} obtidos na AN7 e AN1, foi possível definir que os efeitos de segunda ordem na estrutura com a adição da corrosão correspondem a aproximadamente 99,6% dos determinados pela NBR 6118:2014, em todas as classes de resistência do concreto. Assim, os valores obtidos com base na norma se mostraram superiores, demonstrando que a redução de rigidez proposta pela norma brasileira é capaz de acomodar o nível de corrosão avaliado neste trabalho.

Além disso, observou-se que os concretos com menor resistência sofrem mais com a ação da corrosão, já que apresentaram valores superiores de γ_{zcalc} . Os concretos com um f_{ck} maior, mesmo submetidos a valores superiores de m_l , apresentaram resultados inferiores de γ_{zcalc} , demonstrando maior resistência frente ações externas e à degradação.

A Figura 15, retirada do *software* Abaqus® após a realização das simulações numéricas, traz um conjunto de imagens de um corte da seção transversal da estrutura analisada, na região onde a corrosão foi adicionada, em 3 e em 5 barras de aço, com o concreto C40. É possível observar a evolução das fissuras no concreto em torno das barras de aço conforme o aumento do produto da corrosão. A Figura 15 traz o dano gerado por tensões de tração, medido através da variável DAMAGET (grandeza adimensional).

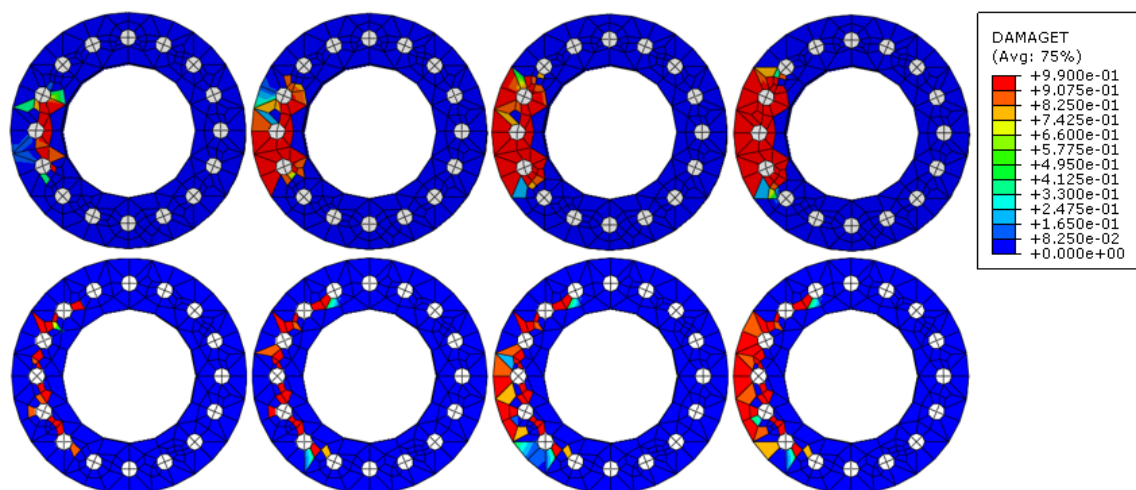


Figura 15. Evolução do dano na estrutura em AN7 e AN11 com o concreto C40

Com a evolução do dano, a convergência numérica é prejudicada, delimitando os valores de corrosão possíveis de serem analisados e indicando que a partir de certo nível a falha pode ocorrer não por instabilidades na estrutura, mas por um alto índice de degradação do concreto na seção transversal.

Assim como observado por Pereira Junior et. al. (2016), o dano se manifestou de forma intensa nas regiões tracionadas da estrutura e, conforme o aumento da fissuração, o encontro das microfissuras levou ao processo de fratura do material.

O concreto ao redor das barras de aço acometidas pela corrosão sofreu com o desenvolvimento de fissuras, tendo um aumento gradual de degradação conforme o aumento da porcentagem de corrosão. Finalmente, a conexão de fissuras desenvolvidas ao redor das barras aumentou os efeitos de segunda ordem na estrutura.

4. CONCLUSÕES

A corrosão, além da degradação do aço, desencadeia um processo de deterioração do concreto, comprometendo o desempenho da estrutura frente ações externas e reduzindo o seu tempo de vida útil, já que interfere em sua integridade, deixando-a ainda mais suscetível ao desenvolvimento de novas manifestações patológicas.

Este trabalho reproduziu uma metodologia para a simulação e validação do comportamento mecânico de elementos estruturais em concreto armado adicionando a este o efeito mecânico imposto pela corrosão, ou seja, a intensificação do processo de fissuração fruto do produto expansivo gerado.

Com o presente estudo, foi possível definir que a corrosão influencia negativamente na estabilidade de elementos em concreto armado, já que intensifica os esforços globais de 2ª ordem na estrutura. Ao comparar os valores do coeficiente γ_z obtidos com as simulações após a adição da corrosão com os calculados a partir da NBR 6118:2014, foi possível definir que os métodos presentes na norma para a consideração das não linearidades físicas em projeto, através de modelos simplificados, são seguros para os níveis de corrosão analisados.

Entretanto, os modelos também indicaram que a partir de certo nível de corrosão, a falha estrutural associada à degradação do concreto, devido ao desenvolvimento de fissuras, pode ocasionar a perda do equilíbrio interno na seção transversal, isto é, antes mesmo que o aumento dos esforços de 2ª ordem seja crítico.

Além disso, a redução de rigidez proposta pela norma brasileira também deve considerar o efeito

reológico do concreto armado, de modo que a presença conjunta destes efeitos e da corrosão podem conduzir a estrutura a um estado não previsto pelos modelos simplificados de cálculo. Desta forma, recomenda-se que pesquisas futuras analisem os efeitos reológicos na presença de intensos níveis de degradação, a fim de precisar o nível de segurança proporcionado pelas simplificações normativas neste cenário.

5. REFERÊNCIAS

- Aitsin, A. C. et al. (2008), *Constitutive modelling of high strength/high performance concrete*. International Federation for Structural Concrete (FIB). Lausanne, Switzerland, p. 125.
- Álvares, M. S. (1993), “*Estudo de um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos*”, Dissertação (Título de Mestre em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 123.
- Amorim Júnior, N. S. A. et al. (2021), *Durability and service life analysis of metakaolin-based geopolymer concretes with respect to chloride penetration using chloride migration test and corrosion potential*. *Construction and Building Materials*, 287, 122970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122970>
- Araujo, A. D. et al. (2020), *Current condition of the exposed concrete façades reinforcement of the Vilanova Artigas building: modern architectural heritage*. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000100013>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1988). *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro
- Ayinde, O. O. et al. (2017), *Numerical simulation of concrete degradation due to chloride-induced reinforcement corrosion*. *Proceedings of the 3rd international forum on energy, environment science and materials*, v. 120.
- Balestra, C. E. T. et al. (2018), *Effect of corrosion degree on mechanical properties of reinforcements buried for 60 years*. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 11, 474-498. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000300003>
- Blanco, Y. D. et al. (2019), *Natural additive (nopal mucilage) on the electrochemical properties of concrete reinforcing steel*. *Revista ALCONPAT*, 9(3), 260-276. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>
- Branson, D. E. (1968), *Procedures for computing deflections*. *ACI Journal*, New York, n. 65.
- Dietrich, Y. P. et al. (2017), *Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais*. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0225>
- El-Maaddawy, T., Soudki, K. (2007), *A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking*. *Cement & Concrete Composites*, v. 29, p. 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.004>
- Favretto, F. et al. (2021), *Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto*. *Revista Matéria*. 2021, 26(3): e13001. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13001>
- Fédération Internationale du Béton/International Federation for Structural Concrete. (2010). *CEB-FIB MODEL CODE*.

- Felix, E. F. et al. (2020), *Development and analysis of a numerical model of the reinforced concrete expansion due to uniform corrosion*. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 10(3), 300-316. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.395>
- Felix, E. F., Carrazedo, R. (2021), *Análise probabilística da vida útil de lajes de concreto armado sujeitas à corrosão por carbonatação via simulação de Monte Carlo*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13043>
- Figueiredo, C. P. et al. (2014), *O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 7, 685-708. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008>
- Franco, M., Vasconcelos, A. C. (1991). *Practical assessment of second order effects in tall buildings*. Colloquium on the CEB-FIB MC 90, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Fusco, P. B. (2008), *“Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados”*. São Paulo: PINI.
- Helene, P. R. L. (1993), *“Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”*, Tese (Livre-docência junto ao Departamento de Engenharia de Construção civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 231.
- Hibbitt, H. et al. (2011), *Abaqus analysis user’s manual version, 6.10*. Dassault Systèmes Simulia Corp.: providence, RI, USA.
- Lee, J., Fenves, G. L. (1998), *A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v. 124, p. 892- 900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- Lublinter, J. et al. (1989), *A plastic-damage model for concrete*. International Journal of Solids and Structures, v. 25, n. 3, p. 299-326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Mackechnie, J. R., Alexander, M. G. (2001), *Repair principles for corrosion-damaged reinforced concrete structures*. Research monograph, 5, 1-36.
- Maldonado-Bandala, E. E. et al. (2018), *Evaluation of pathological problems associated with carbonation and sulfates in a concrete tower with more than 50 years in service*. Revista ALCONPAT, 8(1), 94-107. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.284>
- Malheiro, R. M. D. C. et al. (2014), *Influência da camada do revestimento de argamassa na penetração de cloretos em estruturas de concreto*. Ambiente Construído, 14, 41-55. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100005>
- Meira, G. R., Ferreira, P. R. R. (2019), *Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado*. Ambiente Construído, 19, 223-248. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400353>
- Pereira Junior, W. M. et al. (2016), *Análise numérica de vigas de concreto com fibras de aço utilizando mecânica do dano*. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v. 9, n. 2, p. 153-191. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200002>
- Ramos, É. S., Carrazedo, R. (2020), *Cross-section modeling of the non-uniform corrosion due to chloride ingress using the positional finite element method*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(10), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02627-5>
- Ramos, É. S., Carrazedo, R. (2021), *Numerical analysis of reinforced concrete beam subject to pitting corrosion*. Ambiente Construído, 22, 201-222. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000100588>
- Reginato, L. (2020), *“Contribuição ao projeto de consolos de concreto com base em simulações numéricas”*. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 184.
- Santos, B. et al. (2020), *Effect of the addition of metakaolin on the carbonation of Portland cement concretes*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 13, 1-18. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000100002>

- Schvartzman, M. M. A. M. et al. (2010), *Avaliação da corrosão sob tensão em aço inoxidável AISI 321 em ambiente de reator nuclear*. Matéria (Rio de Janeiro), 15, 40-49. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000100006>
- Silva, S. H. et al. (2015), *Analytic Hierarchy Process to choose the cement type to protect reinforced concrete to corrosion caused by chloride ions attack*. Revista ALCONPAT, 5(3), 174-189. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352015000300174&script=sci_arttext&%20tlng=en
- Silvestro, L. et al. (2020), *Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos*. Ambiente Construído, 21, 101-118. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100496>
- Souza, V. D. B., Leonel, E. D. (2021), *Probabilistic chloride diffusion modelling in cracked concrete structures by transient BEM formulation*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 15. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000400002>
- Teixeira, F. R. et al. (2021), *Avaliação de propriedades relacionadas à penetração de cloretos em concretos produzidos com substituição parcial de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais*. Matéria (Rio de Janeiro), 26. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13029>
- Trevisol, C. A. et al. (2017), *Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado*. Matéria (Rio de Janeiro), 22. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0238>
- Verçoza, E. J. (1991), *“Patologia das edificações”*. [S.I.]: Sagra.
- Wahrhaftig, A. M. (2008), *“Uma avaliação experimental e numérica do efeito da rigidez geométrica na resposta dinâmica de estruturas esbeltas sujeitas à excitação de vento”*. Tese (Título de Doutor em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 209.
- Yu, T. et al. (2010), *Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model*. Engineering Structures, v. 32, n. 3, p. 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.11.013>

Comportamento a flexão de vigas de concreto armado com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão

J. A. Moreno Herrera*¹, J. L. Varela Rivera¹, R. Visairo Méndez², P. Castro Borges²

* Autor de Contato: joel.moreno@correo.uady.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.630>

Recepção: 16/07/2022 | Aceitação: 17/08/2022 | Publicação: 01/08/2022

RESUMO

Neste trabalho, avaliou-se a mudança no comportamento da flexão de vigas de concreto armado. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Os parâmetros eletroquímicos considerados foram velocidade de corrosão, resistividade elétrica e concentração de cloretos. As vigas foram ensaiadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. São apresentados padrões de fissuração, escoamento e cargas máximas, rigidez de escoamento e ductilidade de deslocamento das vigas. Com base na análise desses parâmetros estruturais, conclui-se que o comportamento de flexão das vigas com e sem corrosão foi semelhante.

Palavras-chave: vigas de concreto armado; corrosão; cargas de longa duração; comportamento estrutural; comportamento eletroquímico.

Citar como: Moreno Herrera, J. A., Varela Rivera, J. L., Visairo Méndez, R., Castro Borges, P. (2022), “Comportamento a flexão de vigas de concreto armado com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 422 – 432, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.630>

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, IPN, Unidad Mérida, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Joel Moreno Herrera contribuiu com o planejamento do ensaio (100%), a análise do comportamento estrutural das vigas (50%), bem como a redação do artigo (100%); Jorge Luis Varela Rivera contribuiu com a análise do comportamento estrutural das vigas (50%); Rebeca Visairo Méndez contribuiu com a medição dos parâmetros eletroquímicos (100%), o ensaio das vigas durante o mestrado (100%) e a análise do comportamento eletroquímico (50%); Pedro Castro Borges contribuiu com a análise do comportamento eletroquímico (50%).

Licença Creative Commons

Os direitos autorais (2022) são de propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na terceira edição do ano de 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento da segunda edição do ano de 2023.

Flexural behavior of reinforced concrete beams with electrochemical parameters associated with high level of corrosion

ABSTRACT

In this work the change in the flexural behavior of reinforced concrete beams was evaluated. Beams without corrosion and beams with electrochemical parameters associated with high level of corrosion were considered. The electrochemical parameters considered were the corrosion rate, the electrical resistivity, and the concentration of chlorides. Beams were subjected to vertical incremental loads until failure. Cracking patterns, yielding loads, maximum loads, yielding stiffnesses, and displacement ductilities of beams are presented. Based on the analysis of these structural parameters it is concluded that the flexural behavior of beams with and without corrosion was similar.

Keywords: reinforced concrete beams; corrosion; sustained loads; structural behavior; electrochemical behavior.

Comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzado con parámetros electroquímicos asociados con un nivel de corrosión alto

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el cambio en el comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzado. Se consideraron vigas sin corrosión y vigas con parámetros electroquímicos asociados con un nivel de corrosión alto. Los parámetros electroquímicos considerados fueron la velocidad de corrosión, la resistividad eléctrica y la concentración de cloruros. Las vigas se ensayaron bajo cargas verticales incrementales hasta la falla. Se presentan los patrones de agrietamiento, las cargas de fluencia y máxima, la rigidez de fluencia y la ductilidad de desplazamiento de las vigas. Con base en el análisis de estos parámetros estructurales se concluye que el comportamiento a flexión de las vigas con y sin corrosión fue similar.

Palabras clave: vigas de concreto reforzado; corrosión; cargas sostenidas; comportamiento estructural; comportamiento electroquímico.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado (CA) é um dos materiais mais utilizados na construção civil em todo o mundo. A produção global anual de concreto é estimada em aproximadamente 11 bilhões de metros cúbicos (Ceballos, 2016). Um dos principais problemas que afetam a segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado é a corrosão (Rodríguez, 2014). A corrosão pode começar quando agentes agressivos como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono, entre outros, penetram no concreto (Castro, 1988). A corrosão pode induzir uma degradação nas propriedades físicas e mecânicas do aço da armadura. A referida degradação é atribuída a alterações na composição química devido à reação química do aço com os agentes agressivos do meio ambiente (Maldonado-López, 1996). A corrosão pode causar danos aos elementos CA, como fissuras e deslocamento do cobrimento da armadura. Esses danos causam perdas na resistência e capacidade de deformação dos elementos de CA, colocando em risco a segurança das estruturas. Danos às estruturas associados à corrosão geram custos significativos e perdas econômicas em muitos países (Vázquez-Castillo, 1998). O custo anual de reparos em estruturas de CA no Reino Unido é de aproximadamente £ 755 milhões (Rodríguez, 2014). Nos EUA, o custo de manutenção e reparo da infraestrutura costeira é estimado em US\$ 660 milhões (Xianming et al. 2012). Portanto, medidas de prevenção, avaliação e controle adequado da corrosão são de extrema importância.

Os atuais regulamentos mexicanos sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado concentram-se principalmente em dois aspectos, prevenção e avaliação. As Normas Técnicas Complementares para Projeto e Construção de Estruturas de Concreto (NTCC-2017) especificam recomendações voltadas à prevenção da corrosão. Essas normas propõem recomendações mínimas para a resistência à compressão do concreto e para a espessura do cobrimento de concreto dos elementos estruturais com base nos níveis de exposição ao meio ambiente. Por outro lado, existem normas que especificam recomendações baseadas principalmente no comportamento eletroquímico de vigas de concreto armado. Por exemplo, no NMX-C-514-ONNCCE-2016, os níveis de corrosão são estabelecidos com base na taxa de corrosão. Adicionalmente, a NMX-C-523-ONNCCE-2015 estabelece níveis de risco de corrosão com base na resistividade elétrica do concreto. Essas normas não estão explicitamente associadas ao comportamento estrutural dos elementos de concreto armado.

Existem alguns estudos onde se avalia o comportamento estrutural de elementos de concreto armado afetados pela corrosão. As variáveis mais estudadas foram o nível de corrosão (Gu et al., 2010; Ou et al., 2016; Ye et al., 2018), o diâmetro da armadura de tração longitudinal (Gu et al., 2010; Ou et al., 2016; Shaikh, 2018) e a magnitude das cargas mantidas (Tachibana et al., 1990; Castel et al., 2000; Vidal et al., 2007; Torres et al., 2007; Juárez et al., 2011; Ye et al., 2018). Por outro lado, existem estudos sobre o comportamento eletroquímico de vigas de concreto armado afetadas pela corrosão (Andrade y González, 1978; Andrade et al., 1993; Elsener et al., 2003). Nos estudos anteriores observa-se que o comportamento estrutural e o comportamento eletroquímico dos elementos foram considerados separadamente. Apenas um estudo foi encontrado onde o comportamento estrutural e eletroquímico de vigas de CA estão correlacionados (Yu et al., 2015). No entanto, neste estudo apenas 2 vigas corroídas foram testadas. O único parâmetro considerado para relacionar o comportamento estrutural e eletroquímico foi a taxa de corrosão. Com base na revisão dos estudos anteriores, observa-se que ainda são necessários mais estudos experimentais onde se relacionam outros parâmetros que definem o comportamento estrutural e eletroquímico das vigas de CA. Os parâmetros mais utilizados para avaliar o comportamento estrutural à flexão de vigas de concreto armado são resistência, rigidez e capacidade de deformação. Os parâmetros mais utilizados para avaliar o comportamento eletroquímico são a taxa de corrosão, o potencial de corrosão, a resistividade elétrica do concreto e a concentração de cloretos. As relações entre os parâmetros acima permitirão uma melhor avaliação das estruturas afetadas pela corrosão.

O objetivo deste trabalho é avaliar a mudança no comportamento de flexão de vigas de concreto armado. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Essas vigas foram retirados do trabalho de Moreno-Herrera et al. (2022).

2. METODOLOGIA

2.1 Características das vigas existentes

São 8 vigas de concreto armado, 4 de controle e 4 com corrosão (Moreno-Herrera et al., 2022). As dimensões das vigas foram de 15 x 30 x 350 cm (largura x profundidade x comprimento). As vigas foram projetadas para induzir o comportamento de flexão. A armadura longitudinal consistia de 2 barras #4 (13 mm de diâmetro) na zona de tração e 2 #3 barras (9,5 mm de diâmetro) na zona de compressão. Foram utilizadas barras corrugadas com limite de escoamento nominal (f_y) de 411,88 MPa (4200 kg/cm²). O aço de armadura transversal consistia em estribos nº 2 (64 mm de diâmetro) espaçados a cada 130 mm. Barras lisas com limite de escoamento nominal de 227,51 MPa (2320 kg/cm²) foram usadas. O revestimento livre do aço de armadura longitudinal era de 25 mm. A resistência média à compressão do concreto foi de 17,53 MPa (178,75 kg/cm²). Foram utilizados cimento Portland composto, agregado calcário britado de alta absorção, tamanho máximo do agregado de 19 mm, relação água/cimento de 0,62 e abatimento de 100 mm. As vigas foram moldadas por um trabalhador experiente. A armadura transversal foi pintada com esmalte alquídico anticorrosivo, para induzir corrosão exclusivamente no aço de armadura longitudinal. No caso das vigas de controle, o concreto foi lançado e compactado da forma tradicional. No caso das vigas corroídas, o concreto foi lançado em duas camadas de 150 mm de altura. Na primeira, foi colocado concreto contaminado com cloretos (1,5% do peso do cimento). Na segunda camada foi colocado concreto normal. As vigas foram armazenadas e curadas com água por um período de 28 dias.

As vigas foram submetidas a cargas verticais incrementais até atingirem as tensões de tração alvo na armadura longitudinal (Tabela 1). As cargas foram aplicadas usando um sistema de carregamento de quatro pontos (Figura 1). Com este sistema de carregamento, as vigas foram submetidas a momentos fletores constantes e força cortante zero no terço central das vigas. Na Tabela 1, VC refere-se a vigas de controle e VCC a vigas corroídas, 0,4 e 0,8 referem-se aos percentuais de tensão de tração alvo em armaduras longitudinais (40% e 80% de f_y). A Tabela 1 inclui a carga associada à fissuração por flexão (P_{cr}) e seu deslocamento correspondente (Δ_{cr}), a carga associada à tensão de tração alvo (P_{m1}) e seu deslocamento correspondente (Δ_{m1}), bem como a rigidez inicial (K_o) e rigidez pós-fissuração (K_{cr}) das vigas. A rigidez inicial foi calculada com P_{cr} e Δ_{cr} . A rigidez pós-fissuração foi calculada com P_{cr} e P_{m1} .

Tabela 1. Parâmetros estruturais iniciais das vigas (Moreno-Herrera et al., 2022)

Viga	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_{m1} (kN)	Δ_{m1} (mm)	K_o (kN/mm)	K_{cr} (kN/mm)
VC1-0.4	7.69	0.83	18.17	4.32	10.30	3.00
VC2-0.4	5.20	0.45	18.29	4.25	12.90	3.44
VC1-0.8	8.03	0.80	35.80	10.63	11.18	2.82
VC2-0.8	5.40	0.68	35.31	11.77	8.86	2.70
VCC1-0.4	7.61	0.80	17.88	4.38	10.55	2.87
VCC2-0.4	9.74	0.98	18.37	4.09	11.21	2.78
VCC1-0.8	9.11	1.00	36.11	10.93	10.20	2.72
VCC2-0.8	7.93	0.92	36.37	11.17	9.56	2.78

2.2 Cargas mantidas e corrosão acelerada em vigas existentes

As vigas foram submetidas a cargas mantidas por um período de 166 dias (Moreno-Herrera et al., 2022). Foram consideradas as cargas mantidas associadas às tensões de tração alvo (Tabela 1). As cargas mantidas geraram a mesma distribuição de momentos fletores e esforços cortantes nas vigas obtidos com o sistema de carregamento de quatro pontos descrito acima. Durante este período, ciclos de umedecimento e secagem foram aplicados para induzir a corrosão acelerada. As vigas foram umedecidas a cada 12 horas, uma vez com água potável e outra com soro fisiológico 3,5%. A concentração de cloretos na solução utilizada é semelhante à da água do mar. A Tabela 2 mostra os valores máximos observados para taxa de corrosão em armadura de tração longitudinal, e resistividade elétrica e concentração de cloretos no concreto das vigas. A taxa de corrosão e a resistividade elétrica foram medidas com um corrosímetro (James Instruments, 2010). A concentração de cloreto foi obtida de acordo com a norma NMX-C.523-ONNCCE-2015.

Tabela 2. Parâmetros eletroquímicos das vigas (Moreno-Herrera et al., 2022)

Viga	Velocidade de corrosão ($\mu\text{Amp}/\text{cm}^2$)	Resistividade elétrica do concreto ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)	Concentração de cloreto (%por peso do cimento)
VC1-0.4	0,45	11,97	0,3034
VC2-0.4			
VC1-0.8	0,65	11,08	0,3295
VC2-0.8			
VCC1-0.4	7,01	1,37	2,5853
VCC2-0.4			
VCC1-0.8	5,66	2,47	3,2038
VCC2-0.8			

A Tabela 2 mostra que a taxa máxima de corrosão das vigas de controle (VC) foi associada a um nível de corrosão baixo a moderado ($0,1$ a $0,5 \mu\text{Amp}/\text{cm}^2$) (NMX-C-501-ONNCCE-2015); a resistividade elétrica foi associada a um risco baixo a moderado de corrosão (10 a $50 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$) (NMX-C-514-ONNCCE-2016); a concentração de cloretos foi inferior ao valor limite de $0,52$ proposto para concretos com agregados calcários e com relação a/c de $0,6$ (Castro et al., 1993). Por outro lado, a Tabela 2 mostra que a taxa de corrosão das vigas corroídas (VCC) foi associada a um alto nível de corrosão (maior que $1 \mu\text{Amp}/\text{cm}^2$); a resistividade elétrica foi associada a um alto risco

de corrosão (menos de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$); a concentração de cloreto foi pelo menos 5 vezes superior ao valor limite. Com base no exposto, observa-se que, do ponto de vista eletroquímico, existem vigas com parâmetros associados a um alto nível de corrosão.

Para vigas submetidas à mesma tensão de tração alvo, o padrão de fissuração foi geralmente semelhante. Para vigas com tensão de tração alvo de $0,8 f_y$, foram observadas aberturas e comprimentos de fissura maiores do que aqueles observados para vigas com tensão de $0,4 f_y$. Isso se deve ao fato de que as cargas aplicadas para o esforço de $0,8 f_y$ foram maiores. Após a indução da corrosão, os padrões de fissuração foram semelhantes aos observados antes da aplicação da técnica de corrosão.

2.3 Sistema de carregamento e instrumentação para testar vigas existentes

As vigas de controle e corroídas foram testadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. As vigas foram ensaiadas após o período de aplicação de cargas mantidas e a indução de corrosão. Foi utilizado o mesmo sistema de carregamento de quatro pontos descrito acima (Figura 1). As cargas foram aplicadas usando um atuador hidráulico e medidas usando uma célula de carga. Os deslocamentos verticais no comprimento médio das vigas foram medidos por meio de dois potenciômetros lineares. As deformações em armaduras longitudinais em tração foram medidas usando extensômetros. Antes da concretagem, os extensômetros foram colados à armadura longitudinal em tração (Moreno-Herrera et al., 2022).

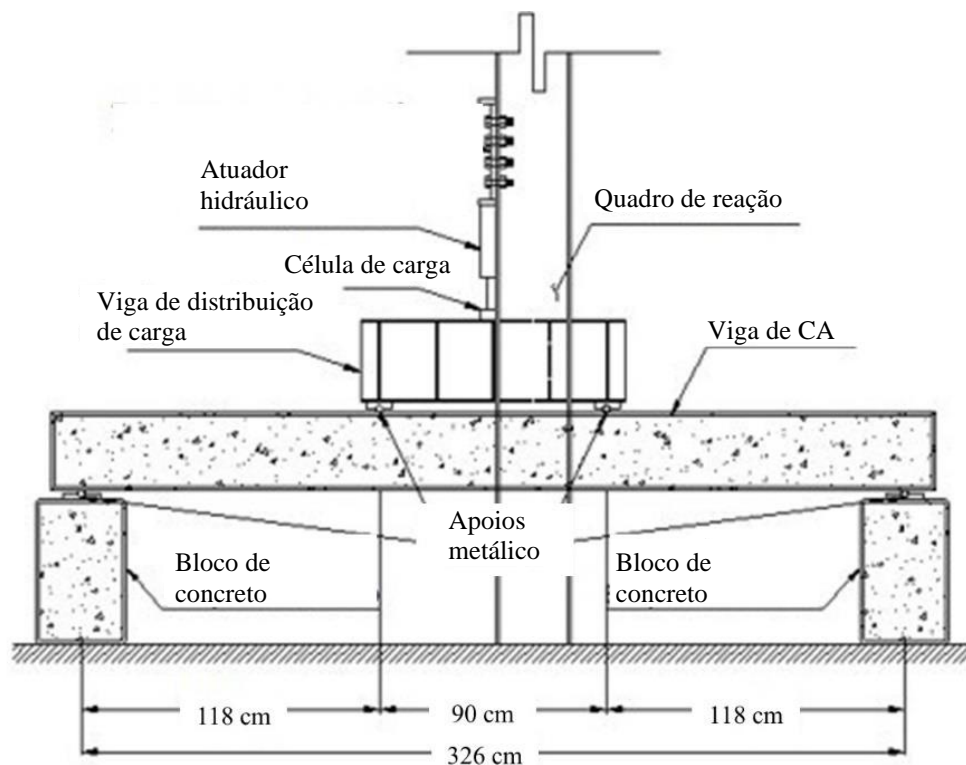


Figura 1. Sistema de carregamento de quatro pontos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra o padrão de fissuração final das vigas. O padrão de fissuração foi semelhante tanto para as vigas de controle quanto para as vigas corroídas. Este padrão foi caracterizado pela formação de fissuras de flexão verticais na parte central das vigas e fissuras de flexão-cisalhamento inclinadas nas extremidades.

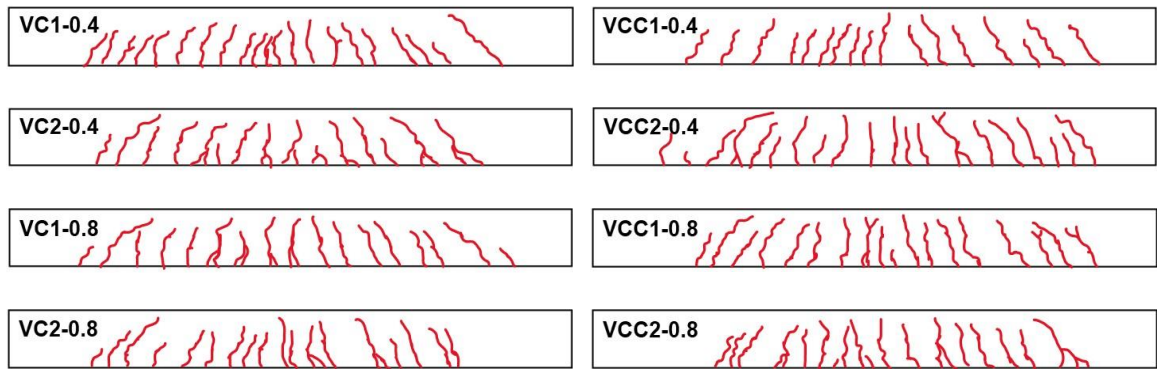


Figura 2. Padrões de fissuração final de vigas

A Figura 3 mostra as curvas carga-deslocamento das vigas. A Tabela 3 mostra a carga de escoamento (P_y) e o deslocamento de escoamento correspondente (Δ_y), bem como a carga máxima (P_{m2}) e o deslocamento máximo correspondente (Δ_{m2}) das vigas. As cargas de escoamento foram determinadas usando as deformações unitárias medidas com os strain gages das vigas. A Tabela 3 inclui a rigidez de fluência inicial (K_y) e a ductilidade de deslocamento (μ) das vigas. A rigidez de escoamento inicial foi calculada usando a carga de escoamento. A ductilidade de deslocamento foi calculada como a razão entre o deslocamento máximo e o deslocamento de escoamento correspondente de cada viga. Para a viga VCC1-0,8, apenas a carga máxima e seu deslocamento correspondente são relatados, devido a problemas com as medições do extensômetro.

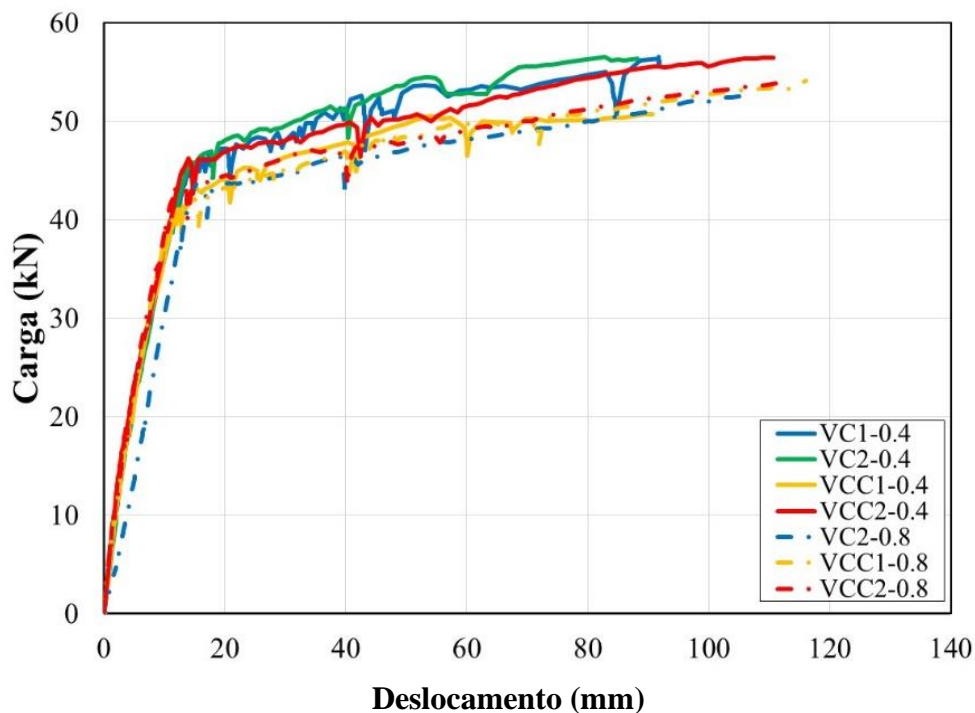


Figura 3. Curvas de carga - deslocamento vertical

Tabela 3. Parâmetros estruturais de vigas ensaiadas à ruptura

Viga	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{m2} (kN)	Δ_{m2} (mm)	K_y (kN/mm)	μ (Δ_{m2}/Δ_y)
VC1-0.4	43,47	13,08	56,54	91,79	3,32	7,02
VC2-0.4	44,09	13,24	54,45	88,18	3,33	6,66
VC1-0.8	--	--	52,93	119,30	--	--
VC2-0.8	42,52	14,35	52,56	105,87	2,96	7,38
Média	43,36	13,56	54,12	101,28	3,21	7,02
CV	0,02	0,05	0,03	0,14	0,07	0,05
VCC1-0.4	42,63	14,11	50,70	90,72	3,02	6,43
VCC2-0.4	46,13	15,59	56,48	110,66	2,96	7,10
VCC1-0.8	41,92	16,54	54,10	116,03	2,53	7,02
VCC2-0.8	42,93	14,44	53,92	112,79	2,97	7,81
Média	43,30	15,17	53,80	107,55	2,87	7,09
CV	0,04	0,07	0,04	0,11	0,08	0,08

A Tabela 3 mostra que as cargas médias de escoamento e as cargas máximas médias juntamente com seus deslocamentos médios correspondentes foram semelhantes para todas as vigas, respectivamente. A razão entre as cargas médias de escoamento das vigas corroídas e as cargas médias de escoamento das vigas de controle foi de 0,99. Por sua vez, a razão entre as cargas máximas médias das vigas corroídas e as cargas máximas médias das vigas de controle foi de 1,01. Adicionalmente, a Tabela 3 mostra que a rigidez de escoamento inicial média foi semelhante para todas as vigas. A razão entre a média das rigidezes de escoamento inicial das vigas corroídas e a média das rigidezes de escoamento inicial das vigas de controle foi de 0,90. Por fim, a Tabela 3 mostra que a ductilidade média de deslocamento das vigas foi semelhante. A razão entre as ductilidades de deslocamento médias das vigas corroídas e as ductilidades de deslocamento médias das vigas de controle foi de 1,01.

Apesar dos valores dos parâmetros eletroquímicos das vigas corroídas indicarem um alto nível de corrosão, não foi observada diferença significativa no comportamento estrutural das vigas corroídas em flexão, em comparação com as vigas controle. A carga de escoamento, a carga máxima, a rigidez de escoamento inicial e a ductilidade de deslocamento das vigas estudadas foram semelhantes. Embora os parâmetros acima sejam adequados do ponto de vista estrutural, os parâmetros eletroquímicos indicam um risco na durabilidade das vigas. Portanto, do ponto de vista eletroquímico, medidas devem ser tomadas para mitigar a corrosão nessas vigas.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Oito vigas de concreto armado foram ensaiadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões e recomendações:

- O padrão de fissuração final das vigas de controle e das vigas corroídas foi semelhante. O padrão foi caracterizado pela formação de fissuras de flexão verticais na parte central das vigas e fissuras de cisalhamento de flexão inclinadas nas extremidades.

- Mesmo quando os valores dos parâmetros eletroquímicos das vigas corroídas indicaram um alto nível de corrosão, não foi observada diferença significativa no comportamento de flexão estrutural das vigas corroídas, comparado ao das vigas controle. A carga de escoamento, a carga máxima, a rigidez de escoamento inicial e a ductilidade de deslocamento das vigas estudadas com e sem corrosão foram semelhantes.
- Embora os parâmetros de comportamento à flexão estudados sejam adequados do ponto de vista estrutural, os parâmetros eletroquímicos indicam risco na durabilidade das vigas. Portanto, medidas devem ser tomadas para mitigar a corrosão nas vigas.
- Recomenda-se o estudo de vigas com parâmetros eletroquímicos associados a níveis de corrosão superiores aos considerados neste trabalho. Parâmetros físicos como fissuras e manchas associadas a níveis mais altos de corrosão também devem ser considerados. Esses parâmetros físicos não foram observados nas vigas estudadas. Isso permitirá estabelecer relações entre diferentes níveis de corrosão e os danos estruturais correspondentes em vigas de concreto armado. Desta forma, pode-se obter a relação entre os parâmetros eletroquímicos e estruturais das vigas. Os níveis de corrosão podem ser definidos com base em parâmetros estruturais, como perda de resistência, rigidez ou capacidade de deformação. Por sua vez, os parâmetros físicos podem ser avaliados com base nas larguras e comprimentos de fissuras longitudinais ao aço de armadura. Este tipo de fissuração é característico em vigas com altos níveis de corrosão.

5. AGRADECIMENTOS

R. Visairo Méndez agradece ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia pela bolsa de mestrado recebida. Da mesma forma, agradecemos à Faculdade de Engenharia da UADY e Cinvestav Mérida pelas facilidades fornecidas para medições estruturais e de corrosão.

6. REFERÊNCIAS

- Andrade F., y González J.A. (1978). Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Materials and Corrosion*, 29(8): 515-519.
- Andrade, C. (1993), Calculation of chloride diffusion-coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, 23 (3): 724-742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3).
- Castro P. (1998). “*Corrosión en Estructuras de Concreto: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*”. 1ª Edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, DF.
- Castel A., François R., Arliguie G. (2000). *Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 1: Experimental study of corroded beams*. *Materials and Structures*, 33: 539-544, <https://doi.org/10.1007/BF02480533>
- Ceballos, M. (2016). “*El concreto, material fundamental para la infraestructura.*” Centro de Innovación Tecnológica para la Construcción. pp. 24-25.
- Elsener, B., Andrade, C. Gulikers, J., Polder, R y Raupach, M. (2003). *Half-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures*. *Materials and Structures*, 36: 461–471, <https://doi.org/10.1007/BF02481526>
- Gu X., Zhang W., Shang D., Wang X. (2010). “*Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams.*” *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, ASCE, 2, 3545–3552. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)339](https://doi.org/10.1061/41096(366)339)

- Juárez, C. A., Guevara, B., Fajardo, G., & Castro-Borges, P. (2011). *Ultimate and nominal shear strength in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion*. *Engineering Structures*, 33(8): 3189-3196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.014>
- Maldonado López, L. (1996). “*Corrosión del acero de refuerzo: revisión del estado del arte en México.*” En F. d. Yucatán (Ed.), VII Seminario de Investigación, (pág. 18). Mérida, Yucatán, México.
- Moreno-Herrera, J., Visairo-Méndez, R., Varela-Rivera, J., Balancan-Zapata, M., y Castro-Borges, P. (2022). Enviado a: *Corrosion, The Journal of Science and Engineering*.
- NMX-C-501-ONNCCE-2015. (2015). “*Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-514-ONNCCE-2016. (2016). “*Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-523-ONNCCE-2016. (2016). “*Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado - Concentración de cloruros solubles en agua y ácido – determinación en concreto hidráulico - Método de extracción y método de determinación por ión selectivo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NTCC-2017 (2017). “*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.*” Órgano del Gobierno del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno. México, D.F.: Administración Pública del Distrito Federal.
- Ou Y., Susanto Y., Roh H. (2016). *Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars*. *Construction and Building Materials*, 103: 93–104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.075>
- Rodríguez-Rodríguez, A. (2014). *Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado*. CENIC: Ciencias Químicas, 45: 52-59.
- Shaikh, F.U.A. (2018). *Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(3), <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0234-y>
- Tachibana Y., Maeda K., Kajikawa Y., Kawamura M. (1990). *Mechanical behavior of RC beams damaged by corrosion of reinforcement*. *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, 178-187.
- Torres Acosta, A., Navarro Gutiérrez, S., & Terán, C. (2007). *Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams*. *Engineering Structures*, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.018>.
- Vázquez Castillo, C. D. (1998). “*Diagnóstico de la corrosión del puente de Celestún.*” Tesis. Mérida, Yucatán, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Vidal T., Castel A., François R. (2007). *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. *Cement and Concrete Research*, 37(11): 1551-1561, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Xianming, S., Ning, X., Keith, F., Jing, G. (2012) *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview*. *Construction and Building Materials*, 37: 36-40, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
- Ye, H., Fu, C., Jin, N., Jin, X. (2018). *Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques*. *Construction and Building Materials*, 162: 286–297, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.108>

Yu, L., François, R., Hiep, V., L'Hostis, V., Gagné, R. (2015). *Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions*. Cement and Concrete Research, 67: 246–258, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.007>

Avaliação das manifestações patológicas do Edifício Rio Negro em Anápolis-Goiás

G. H. Teixeira^{1*}  J. R. Silva¹  E. C. Alves² 

* Autor de Contato: guilherme.henrique.eng@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.586>

Recepção: 14/02/2022 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

Este trabalho mostra a aplicação das metodologias GDE (Grau de Deterioração da Estrutura) e GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) quantificando as manifestações patológicas e determinando os pontos de maior necessidade de manutenção. Dessa forma, foi aplicada uma perspectiva quantitativa com a aplicação das metodologias citadas e após inspeções prediais e uma análise visual com registro fotográfico, anotações e mapeamentos, foram aplicadas as metodologias e obtido que parte das manifestações patológicas que ocorrem na estrutura do edifício tem como origem a umidade, resultando em eflorescências, machas ou infiltrações. Dessa forma, esse trabalho definiu os pontos que necessitam de prioridade, direcionando medidas que posteriormente podem ser tomadas. As metodologias se mostraram eficientes e importantes para tomadas de decisões.

Palavras-chave: patologia; GUT; GDE; edifícios.

Citar como: Teixeira, G. H., Silva, J. R., Alves, E. C. (2022), “Avaliação das manifestações patológicas do Edifício Rio Negro em Anápolis-Goiás”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 433 – 448, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.586>

¹ Universidade Estadual de Goiás, Departamento de Engenharia Civil, Anápolis, Goiás, Brasil.

² Ministério Público do Estado de Goiás, Superintendência de Engenharia, Brasil.

Contribuição de cada autor

Nestes trabalho, Teixeira, G. H. contribuiu com a ideia original de escrita do trabalho (100%), experimentos(100%), coleta de dados(100%) e discussão de resultados(50%). Silva, J.T contribuiu com a supervisão (100%), discussão dos resultados (25%) e correção do texto (100%). Alvez, E.C contribuiu com a discussão dos resultados (25%) e correção do texto (50%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Evaluation of the pathological manifestations of the Rio Negro building in Anápolis-Goiás

ABSTRACT

This paper shows the application of the methodologies GDE (Degree of Structure Deterioration) and GUT (Severity, Urgency, and Tendency) quantifying the pathological manifestations and determining the points of greatest need for maintenance. Thus, a quantitative perspective was used with the application of the previously mentioned methodologies and after building inspections and visual analysis with a photographic record, notes and mappings the methodologies were applied and it was obtained that most of the pathological manifestations that occur in the structure of the building have humidity as origin, resulting in efflorescence, wounds or infiltration. Thus, this work defined the points that need priority, directing measures that can later be taken. The methodologies proved to be efficient and important for decision-making.

Keywords: pathology; GUT; GDE; buildings

Evaluación de las manifestaciones patológicas del edificio Río Negro en Anápolis-Goiás

RESUMEN

Este trabajo muestra la aplicación de las metodologías GDE (Grado de Deterioro de la Estructura) y GUT (Gravedad, Urgencia y Tendencia) cuantificando las manifestaciones patológicas y determinando los puntos de mayor necesidad de mantenimiento. Así, se aplicó una perspectiva cuantitativa con la aplicación de las metodologías citadas y tras las inspecciones del edificio y un análisis visual con registro fotográfico, anotaciones y mapeos se aplicaron las metodologías y se obtuvo que la mayoría de las manifestaciones patológicas que se producen en la estructura del edificio tiene como origen la humedad, dando lugar a eflorescencias, heridas o infiltraciones. De este modo, este trabajo definió los puntos que necesitan prioridad, orientando las medidas que pueden tomarse posteriormente. Las metodologías demostraron ser eficaces e importantes para la toma de decisiones.

Palabras clave: patología; GUT; GDE; edificios.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Anápolis, situada no Planalto Central Brasileiro, no estado de Goiás - Brasil, trata-se de uma cidade centenária, que foi emancipada em 31 de julho de 1907. em virtude disso, há edifícios antigos, e cada vez mais essas edificações estão próximas de atingir a vida útil de projeto, tendo em vista esse fato, é importante destacar a necessidade de investigações a respeito das manifestações patológicas e da realização de vistorias e manutenções periódicas, pois dessa forma se torna possível prolongar o tempo de vida útil da edificação e conservar construções que fazem parte da história do município.

A ausência de manutenções preventivas provoca nas edificações custos elevados com o passar do tempo, conforme a lei de Sitter (1984) citado por Tutikian e Pacheco (2013) e também descrita por Souza e Ripper (2009), como a “lei dos cinco”, em que as intervenções de caráter corretivo possuem um custo de 125 vezes o valor de medidas ainda em fase de projeto, enquanto as manutenções preventivas apresentam custo de 25 vezes esse mesmo valor.

Dessa forma, como trata-se de um edifício com mais de 50 anos, além da sua importância funcional para os moradores, é um elemento que compõe a história da cidade de Anápolis por ser um dos primeiros edifícios residenciais da cidade.

Segundo Souza e Ripper (2009), a patologia das estruturas trata-se de um ramo da engenharia que tem como foco investigar as origens, formas, consequências e mecanismos das manifestações de falhas na estrutura. De maneira semelhante, Bolina, Tutikian e Helene (2019) definem que a patologia das construções trata-se de uma ciência, que por meio de um processo sistemático busca investigar defeitos referentes a edificação como um todo, desde materiais até os elementos que a compõem, com o intuito de conhecer suas origens e as maneiras como se manifestam. Os autores ainda diferenciam o conceito de patologia das construções e das manifestações patológicas, as quais são anomalias e defeitos presentes na edificação que se caracterizam por serem aspectos visíveis indicativos de possíveis problemas.

Além disso para a NBR 16747 (ABNT, 2020), as manifestações patológicas são definidas como o resultado de um processo de degradação que proporciona a redução do desempenho da estrutura, as quais se manifestam através de sintomas.

Durante a execução, outras circunstâncias podem acarretar no surgimento de manifestações patológicas, seja nas condições de trabalho ou relacionadas com a mão de obra, falta de controle de qualidade e irresponsabilidade técnica, fator que é determinante, pois uma fiscalização eficiente combinada com equipes capacitadas diminui a possibilidade de erros. Por fim, por mais que executada corretamente todas as etapas antecedentes é possível o surgimento de manifestações patológicas relacionadas com a utilização inadequada ou a falta de manutenção (Souza; Ripper, 2009). Autores como Junior, Lima e Balestra (2013), destacam a importância das manutenções periódicas a fim de prolongar a vida útil da construção, proporcionando uma melhor qualidade e desempenho da edificação.

Além disso, o concreto é submetido às ações do meio ambiente ao longo de toda a vida útil da edificação, de modo que naturalmente ocorram reações que desencadeiem o surgimento de anomalias na estrutura. Desse modo, deve-se atentar para garantir a conservação da edificação a fim de que ela atue desempenhando sua função corretamente ao longo do tempo para a qual foi projetada. Pensando nisso, é fundamental o estudo da patologia visando reconhecer os problemas e suas respectivas causas (Lopes, 2019).

Com objetivo de auxiliar nesse estudo, dando maior objetividade para as análises e servindo de suporte para a tomada de decisão, algumas técnicas como a metodologia GDE (Grau de Deterioração da Estrutura) e GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) podem ser aplicadas, fornecendo uma quantificação das manifestações patológicas obtida pelas formulações matemáticas propostas pelas ferramentas, o que possibilita identificar o estado de determinada

estrutura e garantir uma visão mais objetiva para a análise (Braga et al, 2019; Lima et al., 2019; Moura; Cavalheiros, 2019; Santana et al., 2019; Medeiros et al., 2020).

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada nesse trabalho foi a da avaliação das manifestações patológicas através das metodologias GDE (2007) e GUT (2014). A coleta de dados foi feita através da inspeção predial por meio da vistoria visual, *in loco*, realizando registros fotográficos das manifestações patológicas identificadas e mapeamento das anomalias em planta de cada pavimento vistoriado. A realização da inspeção teve como base as descrições da norma de Inspeção Predial Nacional do Instituto Brasileiro de Avaliações Pericias de Engenharia - IBAPE (2012), a NBR 5674 (ABNT, 1999), a NBR 16747 (ABNT, 2020) e o Boletim Técnico nº 1 da Associação Brasileira de Patologia das Construções - ALCOPAT (2013). Além disso, foram coletadas todas as informações e documentos a respeito da edificação.

Por meio da metodologia GUT (2014) foram quantificadas as manifestações patológicas para posteriormente realizar um comparativo e indicar o grau de prioridade para tomada de decisão. Através da metodologia GDE/UnB (2007), também com intuito de quantificar as manifestações patológicas, foram calculados os parâmetros de grau de deterioração de elementos, famílias e estrutura, servindo de base para as análises e permitindo a realização da classificação do nível de deterioração dos elementos e da estrutura.

Posteriormente, com base na literatura e com os dados obtidos foi realizado uma comparação e análises dos valores obtidos.

As ferramentas utilizadas para a pesquisa foram planilhas eletrônicas para organização dos dados, um aparelho celular para registros fotográficos, escalímetro, fissurômetro e trena.

2.1 Metodologia GDE

Pela metodologia GDE os elementos vistoriados foram divididos em grupos de Pilares(P); Vigas(V); Lajes(L); Escadas(E); Reservatório superior(R); Reservatório inferior(R) e Juntas de dilatação(J).

Feita essa divisão foi realizada a atribuição dos fatores de intensidade (F_i) e fatores de ponderação (F_p) para cada manifestação presente no elemento, conforme as tabelas presentes no trabalho de Fonseca (2007). Dessa forma foi possível realizar o cálculo do grau de dano, de acordo com as equações (1) e (2).

$$D = 0,8 \cdot F_p \cdot F_i \quad \text{Para } F_i \leq 2,0 \quad (1)$$

$$D = (12 \cdot F_i - 28) F_p \quad \text{Para } F_i \geq 3,0 \quad (2)$$

Onde:

D – Grau de dano

F_i – Fator de intensidade

F_p – Fator de ponderação

Com o grau de dano (D) de cada manifestação, calcula-se o grau de deterioração do elemento (G_{de}) conforme a equação (3).

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^n D_i \right) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right] \quad (3)$$

Onde:

G_{de} - Grau de deterioração do elemento;

D_i - Grau do dano “i”;

$D_{máx}$ - Maior grau do dano no elemento;

n – Números de danos no elemento.

Com o valor do grau de deterioração do elemento relaciona-se um nível de deterioração e assim obtém-se recomendações de ações a serem tomadas. Essa relação pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1. Classificação do nível de deterioração dos elementos.

Nível de deterioração	G_{de}	Ações recomendadas
Baixo	0-15	Estado aceitável Manutenção preventiva
Médio	15-50	Definir prazo e natureza de nova inspeção Planejar intervenção em longo prazo (máximo 2 anos).
Alto	50-80	Definir prazo para inspeção especializada Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano)
Sofrível	80-100	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa Planejar intervenção em curto prazo (máximo 6 meses)
Crítico	>100	Intervenção especializada imediata e medidas emergenciais (alívio de cargas, escoramentos, etc). Planejar intervenção imediata.

Fonte: (Verly, 2015)

Para determinar o grau de deterioração dos elementos divididos em grupos semelhantes é calculado o grau de deterioração da família (G_{df}), o qual é função do grau de deterioração do elemento (G_{de}) através da equação (4).

$$G_{df} = G_{de,máx} \sqrt{1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^n G_{de,i}\right) - G_{de,máx}}{\sum_{i=1}^n G_{de,i}}} \quad (4)$$

Onde:

$G_{de,máx}$ – Maior grau de deterioração do elemento

$G_{de,i}$ – Grau de deterioração do elemento “i” (≥ 15)

m – Número de elementos com $G_{de} \geq 15$

E por fim, ao obter o grau de deterioração de cada família (G_{df}), calcula-se o grau de deterioração da estrutura (G_d). A equação utilizada para esse cálculo é expressa abaixo, equação (5).

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_{r,i} \cdot G_{df,i}}{\sum_{i=1}^k F_{r,i}} \quad (5)$$

Onde:

k – Número de famílias da estrutura;

$F_{r,i}$ – Fator de relevância estrutural da família “i”;

$G_{df,i}$ – Grau de deterioração da família “i”.

Dessa forma, para o grau de deterioração da estrutura, de maneira semelhante ao grau de deterioração do elemento (Gde), pode ser feita a associação a um nível de deterioração e consequentemente obter medidas que podem ser tomadas quanto essa situação. A tabela aplicada para essa análise trata-se da própria tabela 1, pág. 05.

2.2 Metodologia GUT

A metodologia GUT teve origem na década de 1980 através do trabalho de Kepner e Tregoe com o intuito de criar uma ferramenta de planejamento estratégico para auxiliar na tomada de decisões (Fáveri; Silva, 2016). Na construção civil o trabalho de Verzola, Marchiori e Aragon (2014) propôs modificações na metodologia afim de permitir a aplicação em inspeções prediais e diminuir a possibilidade de erros através da subjetividade. A metodologia utiliza as variáveis Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T), nas quais são atribuídos pesos que variam de 1 a 10, sendo 1 atribuído para o menos grave e 10 para o mais grave. Dessa forma, por meio do produto das variáveis (GxUxT) é feita uma classificação de acordo com o quão crítico se encontra cada situação (Verzola; Marchiori; Aragon, 2014).

Alguns pesquisadores como Santana et al. (2019), Moura e Cavalheiros (2019) e Braga et al. (2019), aplicaram em suas pesquisas a metodologia GUT para realização das inspeções e identificar os pontos mais críticos da edificação, mostrando ser prática e possibilitando definir prioridade para tomada de decisões. De acordo com Verzola, Marchiori e Aragon (2014), as tabelas 2, 3 e 4 determinam as notas a serem atribuídas para cada grau de acordo com a variável.

Tabela 2. Classificação para a Gravidade (G).

GRAVIDADE		
Grau	Definição do grau	Nota
TOTAL	Risco de morte, risco de desabamento/colapso pontual ou generalizado. Prejuízo financeiro muito alto.	10
ALTA	Risco de ferimentos aos usuários, danos reversíveis ao meio ambiente ou ao edifício. Prejuízo financeiro alto.	8
MÉDIA	Risco à saúde dos usuários, desconfortos na utilização dos sistemas. Prejuízo financeiro médio.	6
BAIXA	Sem risco à integridade física dos usuários, sem risco ao meio ambiente, pequenos incômodos estéticos ou de utilização. Prejuízo financeiro pequeno.	3
NENHUMA	Nenhum risco à saúde, à integridade física dos usuários, ao meio ambiente ou ao edifício.	1

Fonte: (Verzola; Marchiori; Aragon, 2014)

Tabela 3. Classificação Tendência (T).

TENDÊNCIA		
Grau	Definição do grau	Nota
TOTAL	Progressão imediata. Vai piorar rapidamente, pode piorar.	10
ALTA	Progressão em curto prazo. Vai piorar em pouco tempo	8
MÉDIA	Progressão em médio prazo. Vai piorar em médio prazo.	6
BAIXA	Provável progressão em longo prazo. Vai demorar a piorar.	3
NENHUMA	Não vai progredir. Não vai piorar, estabilizado.	1

Fonte: (Verzola; Marchiori; Aragon, 2014)

Tabela 4. Classificação para Urgência (U).

URGÊNCIA		
Grau	Definição do grau	Nota
TOTAL	Incidente em ocorrência, intervenção imediata passível de interdição do imóvel. Prazo para intervenção: Nenhum	10
ALTA	Incidente prestes a ocorrer, intervenção urgente. Prazo para intervenção: Urgente	8
MÉDIA	Incidente previsto para breve, intervenção em curto prazo. Prazo para intervenção: O mais cedo possível	6
BAIXA	Indício de Incidente futuro, intervenção programada. Prazo para intervenção: Pode esperar um pouco	3
NENHUMA	Incidente imprevisto, indicação de acompanhamento e manutenção programada. Prazo para intervenção: Não tem pressa	1

Fonte: (Verzola; Marchiori; Aragon, 2014)

A nota corresponde ao valor atribuído para cada manifestação patológica de acordo com o grau associado, ou seja, em grau total atribui-se nota 10, alta nota 8, média nota 6, baixa nota 3 e nenhuma nota 1. Assim, atribuída a nota para cada variável da manifestação e realizado o produto desses valores é possível listar os problemas que possuem maior prioridade. Aqueles com maior valor merecem uma atenção especial, pois são os mais graves, urgentes e com tendência de se agravar (Periard, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Manifestações patológicas

Em cada pavimento vistoriado foi realizado um mapeamento para facilitar a identificação dos elementos. Além disso, os elementos avaliados foram divididos em famílias como proposto pela metodologia GDE (2007). Em seguida, as manifestações patológicas identificadas foram apresentadas conforme essa divisão.

Na família de pilares foi somente identificado um elemento, P01, sendo possível notar uma grande exposição das armaduras em processo de corrosão, identificando manchas ao longo das armaduras e deslocamento do concreto devido a expansão das armadura, como pode ser observado na figura 1.



Figura 1. Destacamento do concreto e corrosão das armaduras no elemento P01

Já na família de Lajes, os elementos L01 a L08 foram identificados, conforme a figura 2, e neles destaca-se a constante presença de umidade gerando manchas escuras no elemento L01, destacamento da pintura no elemento L02, formação de estalactites de carbonato de cálcio, devido a eflorescência no elemento L04, pequenas manchas e fisuras nos elementos L05 e L08 e desgaste da impermeabilização no elemento L03. Também nota-se fisuras nos elementos L06 e L07 devido a carregamentos adicionais aplicados por uma antena de telefonia sobre a cobertura.

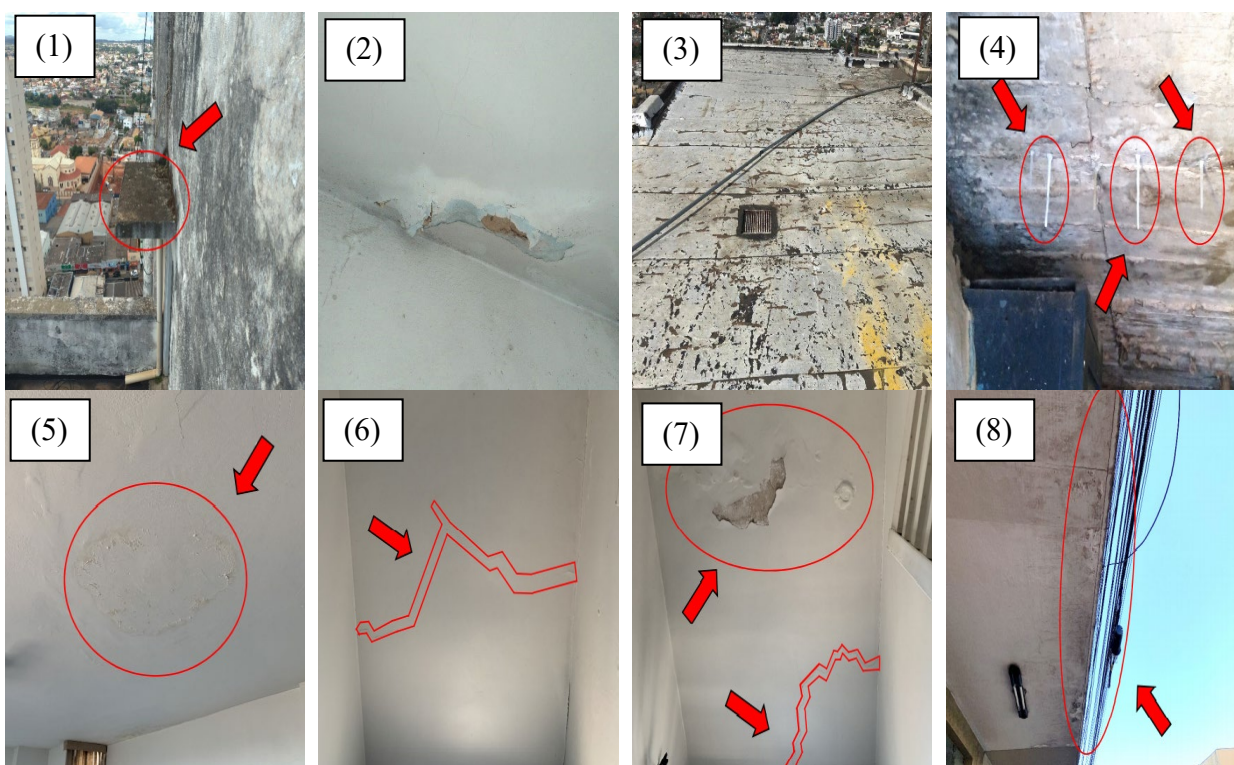


Figura 2. Manifestações patológicas identificadas nas lajes. (1) Manchas escuras no elemento L01. (2) Destacamento da pintura no elemento L02. (3) Desgaste da impermeabilização no elemento L03. (4) Eflorescência com formação de estalactites no elemento L04. (5) Pequenas manchas de umidade no elemento L05. (6) e (7) Fissuras devido carregamento adicional na cobertura, nos elementos L06 e L07. (8) manchas escuras de umidade no elemento L08.

A família do reservatório superior e a família do reservatório inferior apresentaram possíveis falhas em sua impermeabilização, identificadas pelo aspecto característico de manchas claras de eflorescência nos elementos R01 e R02.

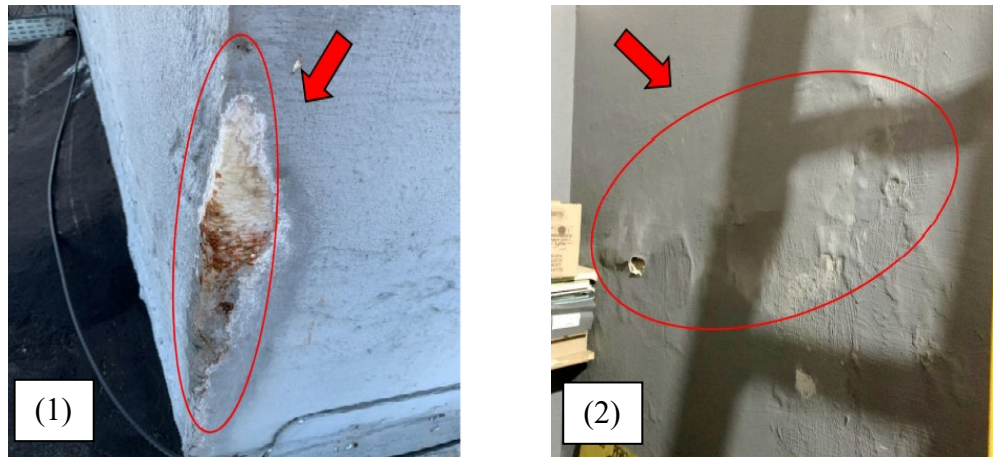


Figura 3. Manchas de eflorescência nos reservatório. (1) R01. (2) R02.

Vale destacar que a família de vigas não apresentou nenhum elemento que demonstrasse o desenvolvimento de manifestações patológicas.

Os elementos da família de escadas e juntas de dilatação foram E01 para a escada e J01 e J02 para as juntas de dilatação, como pode ser observado na figura 4. Nela, nota-se que o elemento E01 apresentou apenas um desgaste nos seus degraus devido às intempéries ao longo dos anos e nos elementos J01 e J02, a constante presença de umidade resultou nas manchas escuras identificadas.

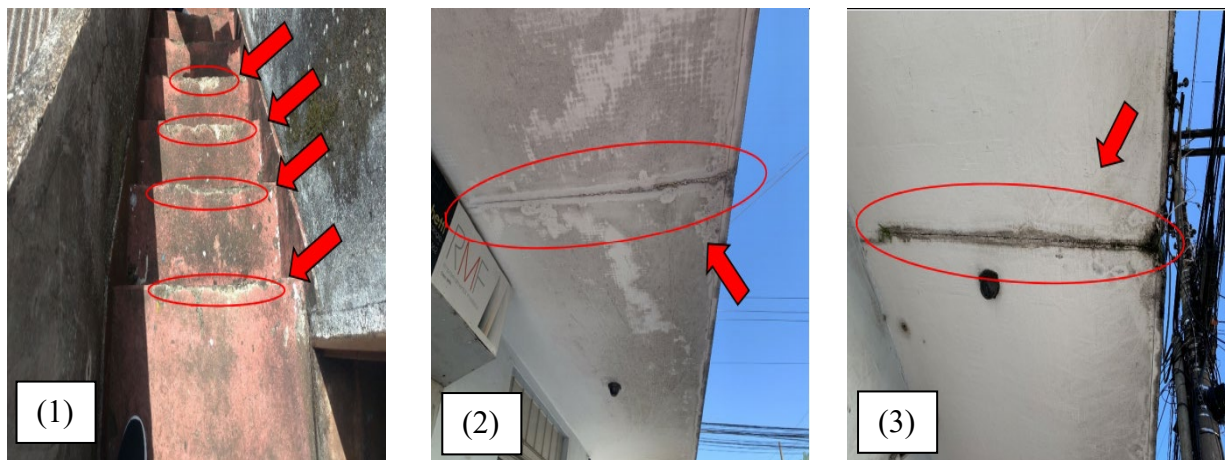


Figura 4. Manchas de eflorescência nos reservatório. (1) Desgaste dos degraus da escada no elemento E01. (2) e (3) Manchas devido a umidade nos elemento J01 e J02.

3.2 Aplicação das metodologias e análises dos resultados

Primeiramente, observou-se que a família que possui a maior quantidade de elementos que apresentam manifestações patológicas trata-se da família de lajes, com 57,14% das anomalias identificadas, como é possível observar na figura 5.

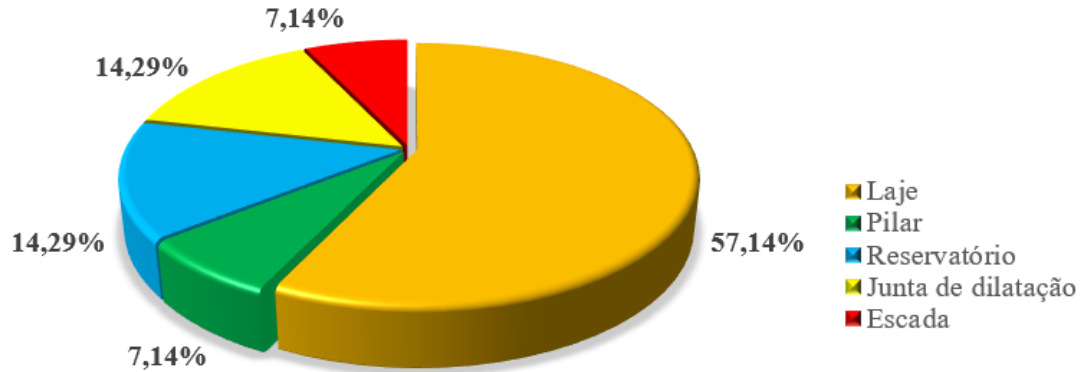


Figura 5. Gráfico da frequência de manifestações patológicas por família de elementos.

Através do mapeamento das manifestações patológicas que acometem o edifício, notou-se que nos 14 elementos estruturais vistoriados, 35,29% das manifestações patológicas são originadas devido a infiltração de umidade como é possível observar na figura 6. Além disso, outras manifestações patológicas como a eflorescência (17,65%) e as manchas escuras (11,76%) também possuem causa semelhante.

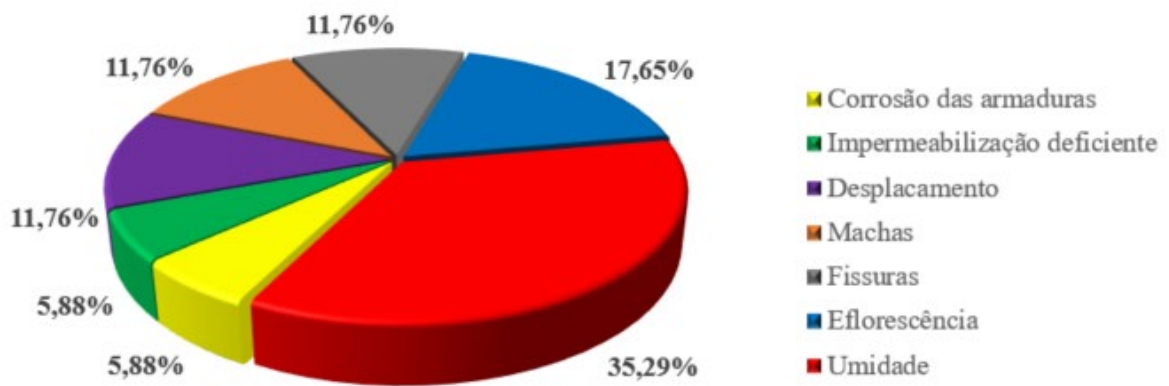


Figura 6. Gráfico da frequência de manifestações patológicas nos elementos.

Em relação a metodologia GDE/UnB (2007) é possível levantar algumas análises com base no modelo de gráfico utilizado por Medeiros et al. (2020). Na família de lajes, o elemento L06 e L07 são os que mais apresentam influência para o cálculo do grau de deterioração da família, como é possível observar na figura 7. Além disso, vale destacar que o elemento L05 não é levado em consideração para o cálculo do G_{df} por apresentar G_{de} menor que 15.

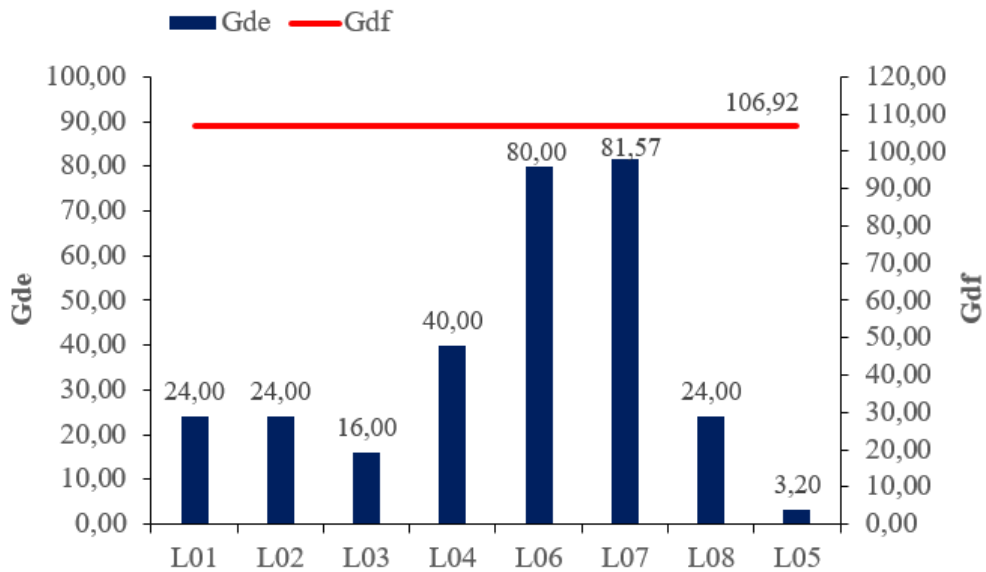


Figura 7. Grau de deterioração das lajes.

As famílias de vigas apresentam grau de deterioração nulo, pois não foi identificado nenhuma manifestação patológica nos elementos que a compõem, na família de escadas, o único elemento identificado apresenta G_{de} menor que 15. Dessa forma, para ambas foi calculado G_{df} igual a zero. Quanto as famílias de pilares e reservatórios superior e inferior, observa-se que elas são compostas por apenas um elemento, logo o valor do grau de deterioração da família corresponde ao próprio valor do grau de deterioração do elemento, isso pode ser visto, respectivamente, nas figuras 8, 9 e 10.

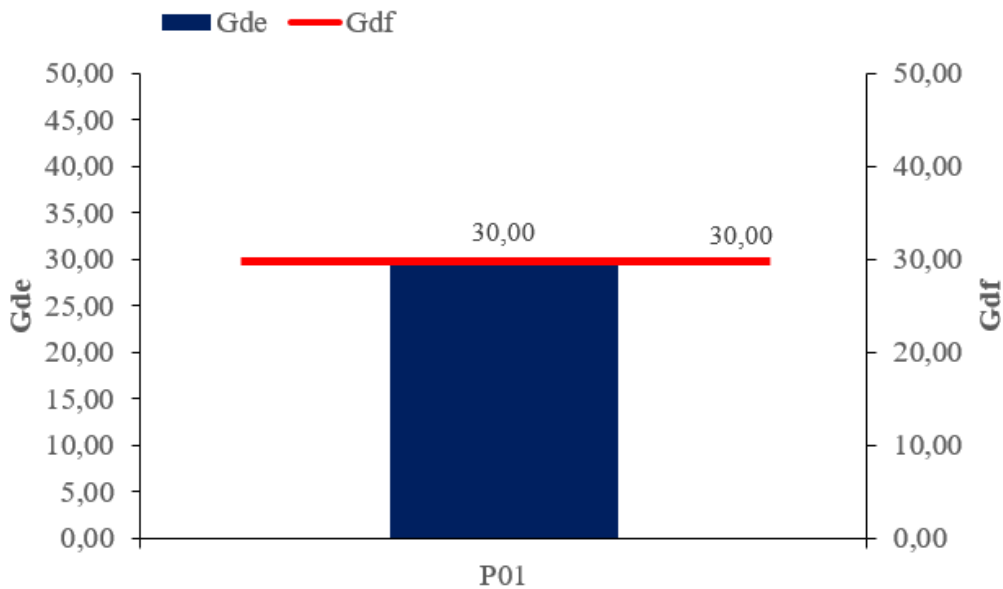


Figura 8. Grau de deterioração dos pilares.

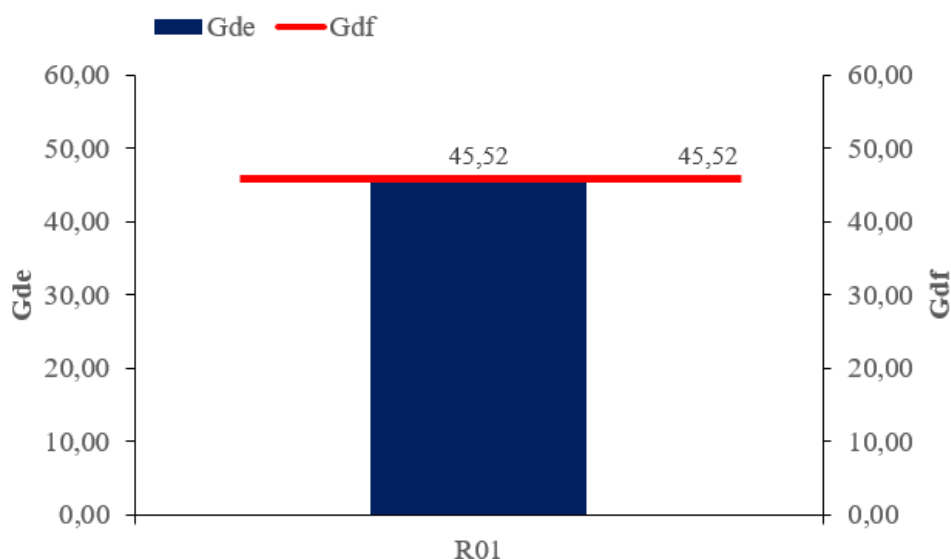


Figura 9. Grau de deterioração do reservatório superior.

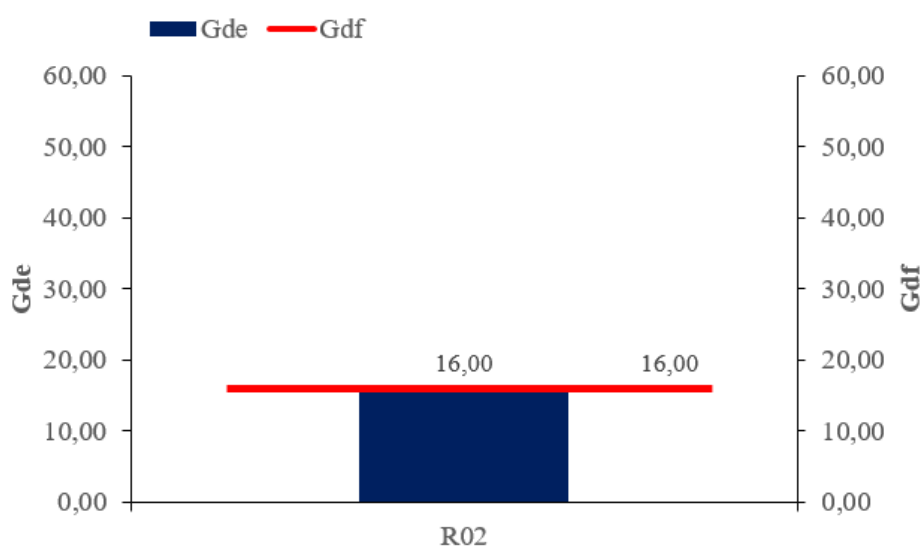


Figura 10. Grau de deterioração do reservatório inferior.

Além disso, nas juntas de dilatação constatou-se a presença de dois elementos que apresentam o mesmo grau de deterioração, porém o grau de deterioração da família é superior ao valor obtido para os elementos individualmente. Dessa forma, pelas formulações matemáticas é possível observar que a influência da repetição de elementos que possuem o mesmo grau de deterioração não representa um aumento tão significativo, uma vez que ela tem como referência o valor máximo, sendo esse valor multiplicado pelo resultado da raiz que envolve o somatório e o valor máximo. A figura 11 mostra o valor de G_{df} e os valores de G_{de} de cada elemento.

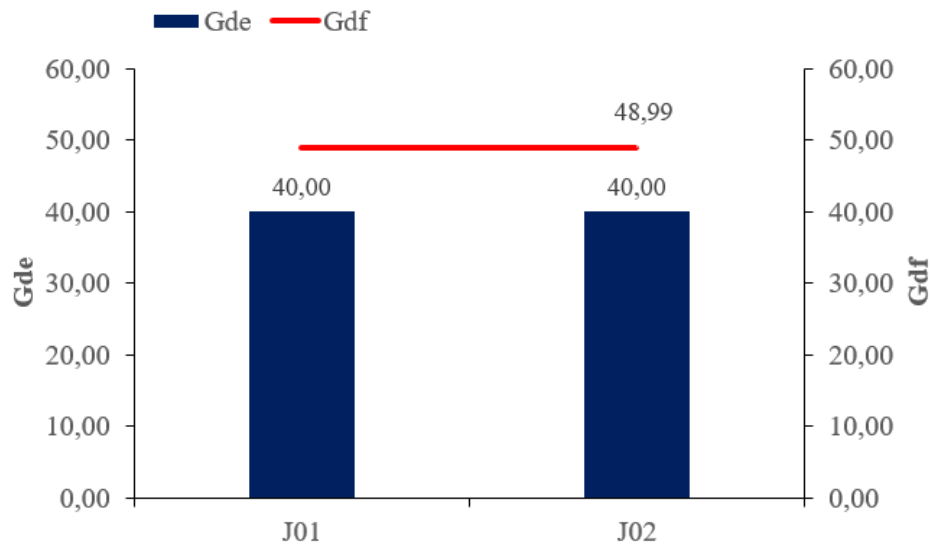


Figura 11. Grau de deterioração das juntas de dilatação.

Dessa forma, ao avaliar o grau de deterioração das famílias e o grau de deterioração da estrutura, nota-se que as lajes são as que representam maior influência para que a estrutura esteja em um nível de deterioração médio, 15 a 50, e por isso necessita de uma intervenção dentro de um prazo máximo de 2 (dois) anos. A figura 12, mostra os valores de G_{df} de cada família em comparação ao valor global da estrutura, G_d .

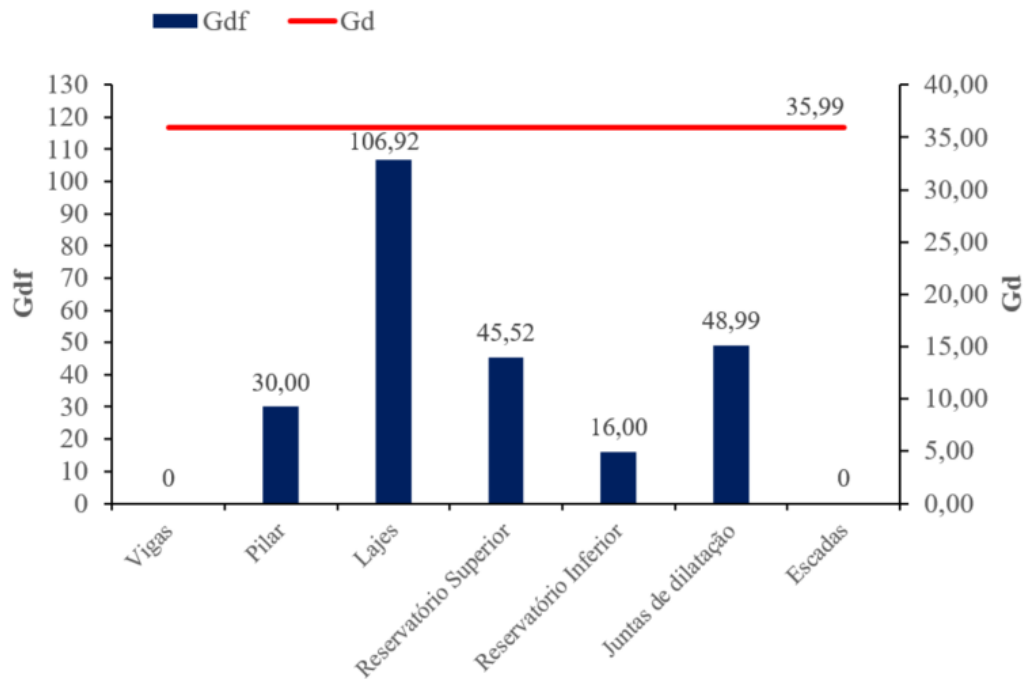


Figura 12. Grau de deterioração da estrutura.

A aplicação das metodologias possibilita definir qual elemento ou manifestação patológica necessita de prioridade dentro do cenário global, o que pode ser determinante para um trabalho assertivo e eficiente. Pela metodologia GDE (2007) é definido que os elementos L07 e L06 necessitam de uma atenção especial, tendo em vista que apresentam um nível de deterioração sofrível e alto, respectivamente, o que implica em uma necessidade de intervenção dentro de um prazo máximo de 6 (seis) meses para o elemento L07 e de 1 ano para o elemento L06. Em

contrapartida, os elementos E02 e L05 apresentam nível de deterioração baixo, necessitando apenas de manutenções preventivas. Os demais elementos estão classificados em um nível de deterioração médio, sendo sugerido intervenções dentro de um prazo máximo de 2 (dois) anos. Além disso, a estrutura apresenta G_d igual a 35,99, classificando-a em nível médio de deterioração, o que requer um prazo de intervenção máximo de 2 (dois) anos. A listagem de prioridades de manutenção está presente na tabela 5(1).

Tabela 5. Tabela de prioridades de manutenção segundo a metodologia GDE e GUT
(1) GDE (2) GUT

Elemento	Gde	Nível de deterioração	Prazo de intervenção	Elemento	Manifestação patológica	Nota	Grau
L07	81,57	Sofrível	6 meses	P01	Corrosão das armaduras	384	Médio
L06	80,00	Alto	1 ano	L06	Fissuras	384	Médio
R01	45,52	Médio	2 anos	L07	Fissuras	384	Médio
L04	40,00	Médio	2 anos	P01	Desplacamento do concreto	288	Baixo
J01	40,00	Médio	2 anos	L04	Eflorescência	288	Baixo
J02	40,00	Médio	2 anos	R01	Eflorescência	216	Baixo
P01	30,00	Médio	2 anos	L02	Umidade	108	Baixo
L01	24,00	Médio	2 anos	L07	Umidade	108	Baixo
L02	24,00	Médio	2 anos	L08	Manchas	108	Baixo
L08	24,00	Médio	2 anos	R02	Eflorescência	108	Baixo
L03	16,00	Médio	2 anos	L01	Manchas escuras	54	Nenhum
R02	16,00	Médio	2 anos	L03	Umidade	54	Nenhum
E01	4,80	Baixo	Manutenção preventiva	J01	Umidade	54	Nenhum
L05	3,20	Baixo	Manutenção preventiva	J02	Umidade	54	Nenhum
				L05	Umidade	27	Nenhum
				R01	Impermeabilização deficiente	27	Nenhum
				E01	Desplacamento	27	Nenhum

Pela metodologia GUT (2014), é possível avaliar apenas as manifestações patológicas separadamente. Dessa forma, tendo como base a escala de valores definidos pela metodologia, nas tabelas 2, 3 e 4, onde de 81% a 100% é definido como um grau total, foi considerado que a atribuição de notas 10 para os três parâmetros, ou seja, nota 1000 representa os 100% e em consequência o percentual dos demais valores podem ser facilmente obtidos e assim atribuir uma classificação para as manifestações patológicas. Definido isso, na tabela 5 (2) as manifestações patológicas foram listadas em ordem de prioridade, ou seja, da maior para a menor pontuação. Nota-se que pela metodologia GUT (2014) ocorre uma certa repetição de valores, o que dificulta a determinação de prioridade. Além de que, boa parte das manifestações patológicas encontram-se em um grau baixo ou nenhum, quanto a gravidade, urgência e tendência, divergindo da metodologia GDE (2007). Porém, para ambas as metodologias é possível definir que os elementos L07 e L06 necessitam de prioridade de manutenção.

4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, observou-se que a maior parte das manifestações patológicas que ocorre na estrutura do edifício está associada a umidade em certo grau, seja originando eflorescência, manchas ou infiltrações. Dessa forma, mostrando ser um fator recorrente e que deve ser solucionado pois podem comprometer as condições de saúde e segurança dos proprietários.

Devido à idade do edifício, os projetos não se encontram com a administração do condomínio, sendo assim não foi possível ter acesso ao projeto estrutural, o que dificultou a identificação de alguns dos elementos estruturais, como foi o caso das vigas e pilares. Devido a esse fato, as análises se tornaram limitadas somente ao que foi vistoriado. O prédio passou por manutenções pontuais à medida que os problemas foram surgindo ao longo do tempo, o que ameniza, em certa proporção, o efeito do tempo sobre a edificação, sendo que a parte superior da construção é a que mais apresenta degradações devido a sua exposição as intempéries.

Em relação a aplicação das metodologias, foi observado que o uso das duas metodologias é complementar. Porém, como também realizado por Santana et al. (2019), constatou-se que o uso somente da metodologia GUT (2014) seria inviável devido aos resultados repetidos, o que dificulta a análise quanto ao aspecto de determinação da prioridade de manutenção. Além de que, a subjetividade ainda é presente na metodologia GUT (2014), em certa proporção, quando comparada a metodologia GDE (2007), pois a atribuição das notas leva em consideração a percepção do avaliador quanto à conceitos como desconforto, incômodos e outros.

Pela metodologia GDE (2007) foi possível determinar o grau de deterioração de cada elemento e definir a prioridade de manutenção e seu respectivo prazo de intervenção. Além disso, determinou-se que o grau de deterioração da estrutura é igual a 35,99, o que corresponde a um nível médio de deterioração e requer uma intervenção dentro de um prazo máximo de 2 (dois) anos. Comparando os valores do grau de deterioração da família com o valor global nota-se que a família de lajes é determinante para definição do valor obtido para a estrutura como um todo, de onde pode ser identificado que a família de lajes necessita de prioridade.

Pela metodologia GUT (2014) foi possível definir a Gravidade, Urgência e Tendência de cada manifestação patológica presente nos elementos e não de cada elemento em si, sendo possível apenas definir uma prioridade de manutenção, sem definir prazo para que ela seja realizada.

Dessa forma, a aplicação das metodologias, apesar das dificuldades apontadas, se mostra eficiente e importante para tomada de decisões, pois permite uma visão geral dos pontos que necessitam de maior atenção e facilitam o processo posterior de manutenção e recuperação dessas edificações.

Assim, em resumo, as prioridades de manutenção do edifício são as lajes L07 e L06, as quais necessitam de uma investigação aprofundada, para identificar se há a necessidade de reforço para resistir ao carregamento adicional e além da recuperação das suas fissuras com objetivo de não ocorrer o agravamento da situação.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Estadual de Goiás pelo suporte para desenvolvimento da pesquisa e a síndica Ilda Helena Nunes pela permissão para realização do estudo na estrutura da edificação.

6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020), *NBR 16747 – Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento*. Rio de Janeiro, 14p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999), *NBR 5674 - Edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro, 6p.
- Bolina, F.; Tutikian, B.; Helene, P. (2019), *Patologia de Estruturas*. São Paulo: Oficina do texto.
- Braga, I. C., Brandão, F. da S., Ribeiro, F. R. C., Diógenes, A. G. (2019). *Application of GUT Matrix in the assessment of pathological manifestations in heritage constructions*. Revista ALCONPAT, 9(3), 320 - 335. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.400>
- Fáveri, R.; Silva, A. (2016), *Método GUT aplicado à gestão de risco de desastres: Uma ferramenta de auxílio para hierarquização de riscos*. Revista Ordem Pública, v. 9, n. 1, p. 93–107.

- Fonseca, R. A. (2007), *Estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção*. 231p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- Ibape-instituto brasileiro de avaliações e perícias de engenharia (2012), *Norma de Inspeção Predial Nacional*. São Paulo. 18p.
- Junior, R.; Lima, M.; Balestra, C. (2013), *Identificação das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado pertencentes ao DCTA*. In: Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas, IX, 2013, João Pessoa. Anais..., João Pessoa, 9p.
- Lima, H. J. N., Ribeiro, R. da S., Melo, G. S. S. de A., & Palhares, R. de A. (2019). *Analysis of pathological manifestations of concrete in urban overpasses*. Revista ALCONPAT, 9(2), 247 - 259. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>
- Souza Lopes, L. (2019). *Patologia da construção em concreto armado e as resoluções dos problemas de manutenção*. Revista Científica da Faculdade de Educação e meio ambiente, 10(1), 23–33. <https://doi.org/10.31072/rcf.v10i1.804>
- Moura, L. G.; Cavalheiros, C. (2019), *Estudo para reabilitação de patologias nas fachadas de uma edificação*. In: congresso latinoamericano de patologia de construcción y congresso de control de calidad em la construcción, XV, XVII, v.2, Tuxtla Gutiérrez. Anais..., Tuxtla Gutiérrez, 2019, 15p.
- Periard, G. (2011), *Matriz GUT- Guia completo, Sobre Administração*, Disponível em: <http://www.sobreadministracao.com/matriz-gut-guia-completo/>. Acesso em: 15/07/2020.
- Santana, et al. (2019), *Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado Submetidas a Ação de Incêndio : uma classificação prioritária para sua recuperação*. In: Congresso brasileiro do concreto, 61, 2019, Fortaleza. Anais..., Fortaleza: IBRACON, 17p.
- Medeiros, A. et al. (2020), *Aplicação de metodologias de inspeção em ponte de concreto armado*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 687–702,
- Souza, V., Ripper, T. (2009), *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda.
- Tutikian, B., Pacheco, M. (2013), *Boletim Técnico nº 1 – Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil*. Mérida. 17p.
- Verzola, S.; Marchiori, F.; Aragon, J. (2014), *Proposta de lista de verificação para inspeção predial X urgência das manutenções*. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, XV, Maceió. Anais..., Maceió, p. 1226-1235.