

Número Comemorativo Revista Alconpat 10 anos de história (2011 - 2021)

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Presidente

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Iván Escalante García, **México**

Vicepresidente Técnico

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Vicepresidente Administrativo Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

Gestor

Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

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

Co-Editor en Jefe:

Dr. Francisco Alberto Alonso Farrera
Universidad Autónoma de Chiapas
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, **México**

Editor Ejecutivo:

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

Dr. Mauricio López.

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

Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidad Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –

INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

REVISTA DA ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE CONTROLE DE QUALIDADE, PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE CONSTRUÇÃO

<http://www.revistaalconpat.org>

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

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é 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 do V11N2 começa com um trabalho do **Brasil**, onde Heber M. Paula e colegas avaliam a incorporação de cinza de biomassa vegetal, cavacos de eucalipto (ECA), bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) e casca de arroz (RHA)., Na mistura de cimento e cal argamassas, considerando suas propriedades e desempenho mecânico. A mistura em volume foi de 1: 1: 6, para substituição parcial do cimento Portland com teor de 15 e 30%. Os ensaios para os resíduos foram para a caracterização das partículas e da atividade pozolânica, enquanto as argamassas foram submetidas à análise no estado fresco e endurecido. Pelos resultados obtidos, os pré-tratamentos (peneiramento e moagem) e a cal adicionada à mistura melhoraram a reatividade das cinzas. O melhor desempenho foi apresentado para argamassas com 15% de substituição, principalmente aquelas contendo RHA.

No segundo trabalho, do **Brasil**, Milton Paulino Costa Junior e S. M. M. Pinheiro verificam a relação entre a ação de cargas que induzem fissuras e a durabilidade do concreto armado. Foram produzidos modelos de teste prismáticos (corpos de prova) e durante dois anos esses corpos de prova foram submetidos à pulverização salina artificial, sob a ação de uma carga central permanente, carga central de curta duração sem carga (referência), com cura de 7 dias. Foram realizados testes de penetração de cloreto e análises microestruturais, além do mapeamento de trincas. Verificou-se que a carga não influenciou nos resultados de penetração do cloreto, entretanto, observa-se que as micrografias e microanálises mostram a formação de produtos de deterioração e possíveis microrganismos, em comparação com os tubos de ensaio que não sofreram carga.

O terceiro trabalho nesta edição é do **México**, onde Jorge Uruchurtu-Chavarín e colegas analisam o desempenho do concreto armado (RC) contra a corrosão, aplicando um revestimento de quitosana na haste. Os corpos-de-prova foram preparados com diferentes quantidades de quitosana utilizando solventes de vinagre de maçã, ácido acético e vinagre de álcool de cana-de-açúcar, e submetidos a testes eletroquímicos de curvas de polarização (PC), potencial de meia célula (HCP), ruído eletroquímico (EN) e resistência de polarização linear (LPR). A quantidade de quitosana e as camadas ótimas (espessura) foram determinadas com uma melhora nas propriedades protetoras e baixas taxas de corrosão foram obtidas do concreto exposto a cloretos por 200 dias. A preservação do revestimento do aço no concreto mostra-se interessante para estudos futuros.

No quarto artigo do **Brasil**, Fernanda Giannotti da Silva Ferreira e colegas estudaram a incorporação do pó de vidro no concreto convencional por sua influência na resistência mecânica e durabilidade. O objetivo deste trabalho foi validar a durabilidade de compostos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD) com substituição parcial do cimento por vidro finamente moído, por meio do ensaio de migração de cloretos, utilizando o método NT Build 492. Corpos de prova contendo valores 0 %, 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro em relação ao volume de cimento, e a avaliação foi realizada aos 28 dias de idade. Os resultados indicaram que, em valores baixos, o pó de vidro não prejudica as propriedades dos compósitos e, em níveis mais elevados, os compósitos mantêm características mecânicas e durabilidade adequadas.

O quinto artigo, de Giovana Costa Reus e colaboradores, vem do **Brasil** e tem como objetivo principal propor um procedimento padrão que possibilite o uso do método colorimétrico para medir a profundidade de penetração de cloretos em inspeções de estruturas de concreto expostas tanto a cloretos quanto a carbonatação. Para evitar o aparecimento de resultados "falsos positivos", soluções de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e hidróxido de sódio (NaOH) foram testadas como pré-tratamento. Os testes foram realizados em amostras apenas carbonatadas e em amostras contaminadas com carbonato e cloreto. Os resultados mostraram que a solução de NaOH elimina a interferência da carbonatação. Portanto, um método adequado foi encontrado para inserir leituras de profundidade de contaminação por cloreto em inspeções de campo de estruturas de concreto.

O sexto trabalho desta edição é de autoria de Gilberto Ramos-Torres e colegas do México, que discutem o método do invariante elástico da rigidez que permite obter a resposta mecânica da superestrutura da ponte; baseia-se na resposta ao impacto de massas conhecidas aplicadas ao centro do vão para obter o deslocamento máximo que define a rigidez do ponto. Isso é comparado com os valores da curva formada com os invariantes de rigidez, construídos a partir das características de projeto da ponte. O método foi implantado em duas pontes localizadas na rodovia federal nº 14 do Estado de Sonora Mex., Com resultados compatíveis com os danos reportados. A avaliação foi qualitativa a partir de um parâmetro global, obtido em condições ambientais na ausência de vento e a temperatura constante, adequado para o diagnóstico do estado estrutural presente, havendo limitações em pontes enviesadas.

No sétimo trabalho, do Brasil, G. S. Munhoz e colegas verificaram a segurança à fadiga de uma ponte projetada em 1987 de acordo com as normas brasileiras em vigor. Um modelo estrutural foi construído para determinar e verificar a seção mais crítica considerando o modelo padrão brasileiro e o espectro veicular da literatura. De acordo com o método de variação de tensões, concluiu-se que o concreto submetido à compressão atende aos critérios, mas a seção de aço não é suficiente para resistir às tensões de cisalhamento e flexão. Pela regra de Palmgren-Miner, a vida útil à fadiga da armadura submetida a flexão é de 13,91 anos. Uma análise mais detalhada da estrutura e do espectro de carga é necessária para confirmar esses resultados.

No oitavo trabalho, do Brasil, CS Silva e colegas fazem uma investigação documental sobre a reação álcali / agregado (RAA) que afetou muitas fundações, o que indica a importância de realizar uma verificação dos procedimentos de recuperação, que é realizada em cinquenta fundações. O

objetivo era traçar um perfil dos processos de recuperação por meio de consulta a empresas de fiscalização ou executores de recuperação na cidade de Recife e cidades vizinhas. Para isso, foi aplicado metodologicamente um questionário com dezessete questões. Estes resultados permitiram estabelecer as semelhanças das fundações afetadas, o diagnóstico, os processos aplicados na recuperação, os avanços nos materiais, as condições de utilização da armadura, os custos, e permitiu identificar as fundações que saíram de uma janela de fiscalização para controles adicionais. O resultado foi uma avaliação dos tratamentos nas bases afetadas pela reação química AAR.

A matéria que fecha a edição é do Pedro Castro Borges do **México** e do Conselho Editorial da Revista Alconpat. O objetivo deste artigo é apresentar à comunidade as conquistas e desafios da Revista Alconpat em seus primeiros dez anos de existência. Foi narrada: como surgiu a ideia de termos uma revista científica / técnica na Alconpat Internacional; quando, como e onde as discussões e o projeto ocorreram; a implementação, a primeira questão, a pontualidade; os requisitos e desafios a cumprir para as primeiras indexações (Scielo México, Scielo WoS, Redalyc, Latindex, Google); os projetos CONACyT que possibilitaram atender gradativamente aos requisitos de eventuais aplicações em índices superiores (Scopus e WoS), repositórios, diretórios (DOAJ) e super servidores; marcações eletrônicas, publicação em três idiomas (espanhol, português e inglês), tempos administrativos para publicação específica, etc. Ao final, um extenso agradecimento é estendido a todos aqueles que participaram desses primeiros 10 anos e o programa de atividades para a celebração acadêmica, realizado em 19 de maio de 2021 em modo virtual, foi adicionado para a posteridade.

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

Em nome do Conselho Editorial

Pedro Castro Borges

Editor in Chief



CONTENIDO

Página

PESQUISA BÁSICA

Gonçalves, C. F., Soares, A. F., Paula, H. M.: Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa.

1 - 16

Pinheiro, S. M. M., Costa Junior, M. P.: Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento.

17 – 37

PESQUISA APLICADA

Rivera-Ortiz, I., Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Uruchurtu-Chavarín, J.: Uso de quitosana como revestimento orgânico para prevenir/inibir a corrosão do concreto armado.

38 – 60

Dias, L. V., Soares, S. M., Salvador Filho, J. A., Ferreira, F. G. S.: Avaliação da migração de cloretos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro.

61 - 75

Vieira Pontes, C., Costa Reus, G., Calvo, A., Medeiros, M. H. F.: Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado.

76 - 88

Ramos-Torres, G., Navarro-Gómez, H., Perez-Isidro, E., Gautherau-Lopez, J., Palma-Quiroz, I.: Proposta de avaliação de danos para duas pontes localizadas na rodovia No. 14 no estado de Sonora, México, usando a variável de rigidez como parâmetro de comparação global.

89 - 108

Rossato, M. D., Munhoz, G. S., P. dos Santos, R. B., Scoz, L. M.: Verificação de Segurança à fadiga de um ponte em concreto armado conforme ABNT NBR 6118, 2014.

109 - 123

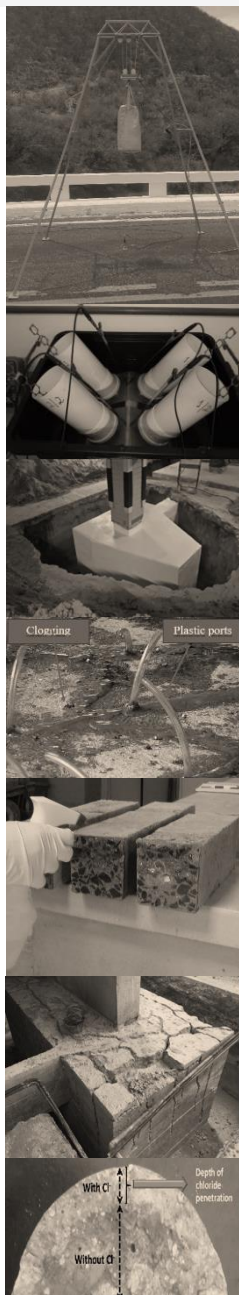
PESQUISA DOCUMENTAL

JSilva, C. S., Monteiro, E. C. B., Santos, M. S. C., Andrade, T. W. C. O., Soares, W. A., Neves, D. C. M.: Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado. Investigação documental.




124 - 145

P. Castro-Borges, E. Sabido-Maldonado, J. M. Mendoza-Rangel, P. Helene, P. Garcés-Terradillos, A. A. Torres-Acosta, M. Fernández-Cánovas, R. Husni, O. Troconis-Rincón, F. Branco, J. I. Escalante-García, F. Alonso-Farrera, M. A. Olavarrieta-Parisot: Revista Alconpat: 10 anos de história (2011 - 2021).

146 - 157



Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa

C. F. Gonçalves¹ , A. F. Soares² , H. M. Paula^{1*} 

* Autor de Contato: heberdepaula@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>

Recepção: 17/04/2020 | Aceitação: 30/12/2020 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a incorporação de cinzas de biomassa vegetal, cavaco de eucalipto (ECA), bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) e casca de arroz (RHA), em argamassas mistas de cimento e cal, considerando suas propriedades e desempenho mecânico. O traço em volume foi 1:1:6, para uma substituição parcial do cimento Portland a teores de 15 e 30%. Os ensaios para os resíduos foram de caracterização das partículas e atividade pozolânica, as argamassas foram submetidas a análises no estado fresco e endurecido. Dos resultados, os pré-tratamentos (peneiramento e moagem) e a cal adicionada a mistura melhoraram a reatividade das cinzas, o melhor desempenho foi apresentado para argamassas com 15% de substituição, principalmente para aquelas contendo RHA.

Palavras-chave: argamassas; substituição parcial do cimento; materiais cimentícios suplementares; cinza de biomassa vegetal.

Citar como: Gonçalves, C. F., Soares, A. F., Paula, H. M. (2021), “*Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa*”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 1 – 16, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>

¹ Master's Degree in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Federal University of Catalão, Catalão, Brazil.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Federal University of Goiás, Catalão, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor C. F. Gonçalves foi responsável pela análise, discussão dos resultados, redação e revisão. A autora A. F. Soares elaborou a metodologia experimental, realizou experimentos e coletou dados. O autor H. M. Paula contribuiu com a ideia original, coordenação dos experimentos, orientação e supervisão de todas as atividades.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar

ABSTRACT

The present research aims to evaluate the incorporation of vegetable biomass ash, eucalyptus chips (ECA), sugarcane bagasse ash (SCBA) and rice husk ash (RHA), in mixed mortars of cement and lime, considering its properties and mechanical performance. The volume ratio was 1: 1: 6 for a partial replacement of Portland cement at a rate of 15 and 30%. The tests for the residues were of characterization of the particles and pozzolanic activity, while that of the mortars were submitted to analyses in the fresh and hardened state. From the results, pretreatments (sieving and grinding) and lime added to the mixture improved the reactivity of the ashes and the best performance was presented for mortars with 15% substitution, mainly for those containing RHA.

Keywords: mortars; partial replacement of cement; supplementary cement materials; vegetable biomass ash.

Caracterización y viabilidad del uso de cenizas de biomasa vegetal en mortero

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la incorporación de cenizas de biomasa vegetal, chips de eucalipto (ECA), bagazo de caña de azúcar (SCBA) y cáscaras de arroz (RHA), en morteros mixto de cemento y cal, considerando sus propiedades y rendimiento mecánico. La mezcla por volumen fue 1: 1: 6, para un reemplazo parcial de cemento Portland con un contenido de 15 y 30%. Las pruebas para los residuos fueron de caracterización de las partículas y actividad puzolánica, mientras que los morteros fueron sometidos a análisis en estado fresco y endurecido. De los resultados obtenidos, los pretratamientos (tamizado y molienda) y la cal añadida a la mezcla mejoraron la reactividad de las cenizas, el mejor comportamiento se presentó para los morteros con 15% de sustitución, principalmente para los que contienen RHA.

Palabras clave: morteros; reemplazo parcial de cemento; materiales de cemento suplementarios; cenizas de biomasa vegetal.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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 construção civil é um segmento que responde por uma elevada demanda de matéria-prima, ao passo que libera quantidades significativas de CO₂ na atmosfera (Noor-Ul-Amin, 2014; Berenguer et al., 2018). Para minimizar esta problemática, alguns resíduos da agricultura têm sido incorporados pela indústria da construção (Chatveera e Lertwattanaruk, 2014). E muito disso devido ao fato de que as cinzas possuem propriedade pozolânica, que desempenham papel significativo quando incorporadas ao cimento (Hossain et al., 2016).

Essa propriedade é identificada em materiais chamados pozolânicos que possuem sílica ou alumina no estado amorfo, que em contato com água reagem com o óxido de cálcio presente na cal ou no cimento, originando uma substância com propriedades cimentícias (ASTM C 618-19; Farinha et al., 2018). Para tanto, além de um estado não cristalino, as pozolanas deverão possuir um refinamento de suas partículas, isto é, apresentar uma elevada área superficial específica (Roselló et al., 2017).

A composição física, química e mineralógica destes resíduos agroindustriais é diversa, sendo função do tipo de biomassa, espécie, condição de crescimento, técnicas de colheita, transporte, armazenamento, processo de combustão e de inúmeras outras condições que possam melhorar - ou não - o seu conteúdo (Zajac et al., 2018). Em geral, compõem-se de aluminossilicatos em fase amorfa e cristalina, sendo o dióxido de silício o de maior percentual em amostras de cinzas de casca de arroz (CCA) e bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), e o óxido de alumínio nas cinzas de origem lenhosa (Farinha et al., 2018; Fernandes et al., 2016; Kazmi et al., 2017; Ukrainczyk et al., 2016). Tem-se, também, a presença de óxidos de outros metais como o ferro, magnésio, cálcio e potássio. Além de carbonatos e carbono não queimado, comumente encontrados em cinzas de origem florestal como, por exemplo, a de cavaco de eucalipto (CCE). E que, quando aplicados em sistemas cimentícios, são responsáveis por uma demanda de água maior na mistura, em função da elevada perda ao fogo (Arif et al., 2016; Ban e Ramli, 2010; Garcia e Sousa-Coutinho, 2013; Ribeiro et al., 2017).

Apesar disso, os diferentes níveis de substituição podem causar a melhoria das propriedades de durabilidade, resistência da argamassa, diminuição do custo de material na construção (Hossain et al., 2016), boa compactação e baixa evolução do calor durante a hidratação (Noor-ul-amin, 2014), eficazes ao controlar expansões de deterioração devido a reações de álcali-agregado (Esteves et al., 2012) bem como, reduzem o uso de combustíveis fósseis, formam matéria-prima e geram rendimentos para os trabalhadores envolvidos nos processos de transporte, infraestrutura, desenvolvimento tecnológico e aplicação propriamente dita (Prasara-a e Gheewala, 2017).

Então, a utilização das cinzas como material de substituição parcial do cimento, verte para além das questões sustentáveis, englobando as econômicas e sociais (Prasara-a e Gheewala, 2017). Contudo, a comercialização dos resíduos e a aplicação na construção é quase inexistente, mesmo com o crescente interesse em materiais cimentícios suplementares, oriundos de biomassa, nas pesquisas de caráter científico (Roselló et al., 2017), ou com a possibilidade de que novos materiais possam melhorar o desempenho de edificações e materiais, promovendo maior controle de qualidade e minimizando o desenvolvimento de patologias, por exemplo. Com isso, faz-se necessário que mais estudos quanto a viabilidade de utilização dos resíduos de combustão em argamassas e concretos sejam realizados (Ukrainczyk et al., 2016).

Estudos esses impulsionados porque, além das cinzas apresentarem bons resultados quando substitutos parciais do cimento Portland, são subprodutos de commodities baratas e abundantes em todo globo, até então, lançadas em aterros sem nenhuma preocupação ambiental (Moraes et al., 2014; Zajac et al., 2018; Berenguer et al., 2018). Em 2012, 34 milhões de toneladas de CCA foram descartadas. No ano seguinte, nos Estados Unidos, estima-se que foram produzidas de 1,25 a 5,6 milhões de CBCA (Martirena e Monzó, 2017; Paris et al., 2016). E pelo crescente uso de biomassas

para geração de energia, uma das mais importantes fontes de produção renovável, com projeções de crescimento para os próximos anos, respondendo também por uma maior disponibilidade de cinzas (Zajac et al., 2018).

Ou ainda, a confirmação de que países como o Brasil possam ter indústrias capazes de beneficiar resíduos de biomassa para aplicação na construção, como é abordado nos trabalhos de Moraes et al. (2014) e Regô et al. (2015), por exemplo. O primeiro, analisou as possíveis utilizações para os subprodutos da cadeia do arroz, o último, caracterizou as CCA produzidas no país e a sua aplicação em matrizes cimentícias. Dos resultados, para ambos, as vantagens abordadas foram garantidas, além de evidenciarem que dos resíduos aqui obtidos, a composição química é pouco variável, facilitando assim o seu emprego em produtos da construção.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é verificar a viabilidade técnica do uso de diferentes tipos de cinzas de biomassa – CCE, CBCA e CCA –, a diferentes porcentagens de substituição, como material cimentício suplementar em argamassas mistas, que contém em sua composição dois aglomerantes, o cimento e a cal, visando a diminuição parcial de cimento Portland.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e caracterização

A argamassa de referência utilizada é do tipo mista - cimento Portland, cal hidratada, agregado miúdo natural e água tratada, tal como especificado pela NBR 13529 (ABNT, 2013). O cimento é o de alta resistência inicial (CP – V ARI) ou do tipo III, para a NBR 5733 (ABNT, 1991) e ASTM C 150M-20, respectivamente. O cimento foi escolhido por possuir pouca ou nenhuma adição em sua composição, proporcionando uma melhor investigação do comportamento do material em função da incorporação dos resíduos.

A cal usada é a do tipo hidratada com carbonatos, classificada como CH – III, conforme NBR 7175 (ABNT, 2003) e ASTM C 206-3, conferindo a mistura maior plasticidade, melhor trabalhabilidade e maior retenção de água, além de ser tradicionalmente utilizada na região e de fácil obtenção. Por fim, o agregado miúdo é a areia natural seca, com denominação comercial “média” e especificações de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), sem nenhum tipo de tratamento como peneiramento ou lavagem. A areia foi extraída por dragagem nos rios Veríssimo e Paranaíba na cidade de Catalão – GO.

Os três tipos de cinza de biomassa vegetal empregadas são subprodutos da combustão, usada para geração de calor e energia, classificadas como classe C pela ASTM C 618, pozolanas vegetais para uso em concreto. A CCE foi obtida junto a uma mineradora e beneficiadora de nióbio e fosfato, o resíduo provém do emprego do cavaco de eucalipto em fornalhas para a geração de calor, com o intuito de secar a rocha fosfática, onde as temperaturas atingem entre 1000 e 1100° C. A CBCA, fornecida por uma usina produtora de açúcar, etanol e energia, é retirada de caldeiras, onde o bagaço da cana foi queimado para a geração de energia. A CCA é um subproduto de uma indústria alimentícia, que utiliza a casca para geração de calor, com o intuito de beneficiar o café. Para as duas últimas, não foram disponibilizadas informações quanto ao processo de obtenção dos resíduos.

A composição química determinada por Resende (2013), de Souza et al. (2014) e Berenguer et al. (2018), realizada pela técnica de Espectrometria de fluorescência de raios X, é apresentada na Tabela 1, são cinzas com particularidades similares as aqui estudadas.

Tabela 1. Concentração de óxido (% em massa) das cinzas analisadas.

Compostos	CCE (Resende, 2013)	CCA (de Souza et al., 2014)	CBCA (Berenguer et al., 2018)
SiO ₂	6,38	93,25	84,86
Al ₂ O ₃	22,60	<0,1	1,91
Fe ₂ O ₃	10,90	0,02	3,83
CaO	27,40	0,57	2,96
MgO	6,15	0,19	2,54
TiO ₂	2,41	<0,1	0,75
P ₂ O ₅	2,75	0,51	0,38
Na ₂ O	0,28	-	0,47
K ₂ O	4,29	2,18	1,38
MnO	0,41	0,25	0,19

2.2 Tratamento das cinzas

Os resíduos de biomassa foram submetidos aos pré-tratamentos de peneiramento e moagem garantindo um aumento da superfície específica, com partículas de menor granulometria e, dessa forma, auxiliando a ocorrência da atividade pozolânica. Procedimentos esses sugeridos por Ramos et al. (2013), Matos e Sousa-Coutinho (2013), Salvo et al. (2015), Modolo (2015), Ataie e Riding (2016).

Assim, as cinzas foram passadas na peneira de malha 50 mesh (abertura de 297 µm), eliminando partículas grossas, em sua maioria constituídas por material inerte, como solo e fragmentos de rocha. Depois, moídas em um moinho de bolas por 30 min a uma rotação de 30 rpm - para períodos maiores, as partículas começam a se agregar (Xu et al., 2015).

2.3 Padrões normativos e ensaios experimentais

2.3.1 Caracterização das partículas

O ensaio de densidade de partículas seguiu a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária – EMBRAPA (2011) pelo método do balão volumétrico. As amostras de 20 g, separadas em recipientes de massa conhecida, foram colocadas para secar em estufa a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, esfriadas em dessecador, pesadas e transferida para um balão volumétrico de 50 ml contendo álcool etílico, de modo a retirar o ar ou vazios das cinzas e do cimento.

Para o índice de finura das cinzas, NBR 15894-3 (ABNT, 2010), 20 g de amostra foram dispersas em 400 ml de solução de hexametáfosfato de sódio a 12,5 g/l e peneiradas em uma malha 45 µm, diâmetro nominal de 200 mm, sob um fluxo constante de água de vazão 5 l/s durante 10 min. O material retido foi transferido para um vidro de relógio, colocado para secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, determinando-se assim a sua massa seca. Para aqueles com 20% ou mais de material retido na peneira 45 µm poderão ser classificadas como pozolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014).

Quanto ao índice de finura do cimento NBR 11579 (ABNT, 1991), pelo método manual, a peneira utilizada foi a de malha 75 µm e número 200. O ensaio consiste em peneiramentos de modo que, inicialmente, 50 g de amostra foram pesadas e, terminado apenas quando o material passante corresponde a uma massa menor que 0,05 g. Essa propriedade também pode ser avaliada seguindo-se as indicações da NBR NM 76 (ABNT, 1998) ou ASTM C 204-05, para o Método de Blaine.

Os ensaios de gravimetria possibilitaram determinar o teor de umidade, NBR NM 24 (ABNT, 2003) e ASTM D 3173-73, onde foram pesadas 1 g de cada amostra, secas em estufa a 105 ± 4 °C por 30 min., com períodos subsequentes de 10 min., até que a massa atingida fosse constante. Os resultados determinados deverão ser menores ou iguais a 3 (três), tal como indicado na NBR 12653 (ABNT, 2014).

Na perda de fogo, NBR NM 18 (ABNT, 2004) pelo Método nº 1, as amostras de cinzas foram calcinadas a forno em uma mufla - Graus Bravac M2 Elétrico Inox –, durante 50 min. a 900 °C a uma taxa de aquecimento de 35 °C/min. Finalizada a queima, os cadinhos foram deixados por 5 (cinco) horas na mufla e, posteriormente, postos em dessecador para finalização do resfriamento e futura pesagem. O mesmo procedimento pode ser realizado seguindo as recomendações da ASTM D 7348 – 13, em etapa única, a uma temperatura máxima de 900 °C (Método B). Para que sejam classificados como pozolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014), os limites de perda deverão ser menores ou iguais a 6.

2.3.2 Proporcionalamento, moldagem dos corpos de prova e cura

A influência da substituição parcial da CCA, CBCA e CCE no desempenho da argamassa foi estudada através da comparação entre o comportamento de um traço tomado como referência, sem resíduos, e outro com a substituição de 15 e 30% em massa do cimento Portland para cada tipo de cinza, Tabela 2. Esses teores de substituição foram definidos, a partir dos melhores resultados apresentados nas pesquisas de Paris et al. (2016), Hossain et al. (2016), Abbas et al. (2017), Isabelle et al. (2011), Resende (2013) e Ukrainczyk et al. (2016).

O traço em volume foi o de 1:1:6 (cimento, cal e areia), podendo ser utilizada como argamassa de assentamento e revestimento, para ASTM C 270-19, argamassa do tipo N. E considerando as análises de Dubaj (2000) e Campos (2014), este proporcionalamento apresentou melhor desempenho para as propriedades de argamassa. A quantidade de água foi determinada por meio do índice de consistência, NBR 13276 (ABNT, 2016), fixado no intervalo de 265 ± 5 mm.

Os corpos de prova prismáticos com substituição parcial do cimento foram identificados com a sigla referente a cada cinza – CCA, CCE e CBCA – e com índice 15, para aqueles com 15% de substituição, ou 30, para aqueles com 30% de substituição. Os corpos de prova moldados com o traço de referência, foram identificados com a sigla CPD (corpo de prova de referência).

O proporcionalamento em massa utilizado na preparação dos corpos de prova de argamassa foi realizado de modo que o total de material seco da mistura fosse igual a 2,5 kg, Tabela 2. A mistura foi preparada de acordo com o método especificado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), sem um misturador mecânico. E a fim de atingir o índice de consistência estabelecido, foi realizado o ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa (flow table), NBR 13276 (ABNT, 2016).

Tabela 2. Proporção em massa (kg) dos materiais utilizados para a produção das argamassas.

Amostra	Cimento	Cal	Areia Seca	Cinza	Água
CPD	0,258	0,103	2,130	0,000	0,625
CCA15	0,219			0,039	0,750
CCA30	0,181			0,077	0,650
CBCA15	0,219			0,039	0,625
CBCA30	0,181			0,077	0,625
CCE15	0,219			0,039	0,670
CCE30	0,181			0,077	0,725

Preparada a mistura, os corpos de prova (CDP) foram moldados em formato prismático, com dimensões 4cm x 4cm x 16cm, sendo produzidos 3 (três) corpos de prova por idade para a argamassa de referência e para cada tipo de cinza com as duas faixas de substituição, totalizando 42 corpos de prova (NBR 13279, 2005; BS EN 1015-11). Após a moldagem, os moldes com a mistura foram envoltos por papel filme e submetidos a cura seca em ambiente laboratorial, a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$.

É sabido que, havendo perda de água e umidade durante a cura, as propriedades mecânicas e de absorção de água estarão comprometidas, por isso da necessidade de que seja realizada dentro dos padrões estabelecidos pela ASTM C 309-19 e ASTM C 1315-19. Contudo, a escolha por uma cura não submersa reflete o caráter da pesquisa em identificar o comportamento das cinzas em sistemas cimentícios, principalmente no que se refere a sua capacidade de interferir na umidade necessária a hidratação do cimento.

Completadas 48 horas, dado o fim do período de cura, os CDP foram retirados dos moldes e envoltos novamente em papel filme até o momento da realização dos ensaios de resistência mecânica.

2.3.1 Avaliação das argamassas no estado endurecido

Os ensaios de tração na flexão e compressão simples, NBR 13279 (ABNT, 2005) e BS EN 1015-11, foram feitos com o intuito de analisar o desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa ao longo do tempo de cura aos 14 e 28 dias. A análise de resistência foi realizada apenas para essas idades uma vez que a reação pozolânica se dá de maneira lenta e, com isso, segundo Ataie e Riding (2016), para idades iniciais não se obtêm resultados consideráveis.

Os resultados encontrados para resistência à compressão e à tração na flexão aos 14 e 28 dias foram obtidos calculando-se a resistência média dos seis corpos de prova ensaiados para compressão, e os três ensaiados para tração na flexão, através da análise múltipla de médias utilizando o método de Tukey, a 5% ($p < 0,05$) de nível de confiança. Além disso, foi respeitado o valor de desvio absoluto máximo de 0,5 MPa para os resultados individuais atingidos na compressão e 0,3 MPa para os alcançados no ensaio de tração na flexão, NBR 13279 (ABNT, 2005).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias, conforme prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005). Inicialmente determinou-se a massa de cada corpo de prova ainda seco e, posteriormente, as amostras foram posicionadas sobre um suporte dentro de um recipiente com água, em imersão parcial para uma lâmina d'água constante de 5 ± 1 mm. Por fim, cada amostra foi retirada do recipiente, seca com pano úmido e pesada aos 10 min. e aos 90 min. dado o início do ensaio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização física e química analisada neste estudo, importante para a compreensão do comportamento das partículas e a sua influência nas reações pozolânicas, foi feita a partir dos resultados obtidos para a densidade de partícula (DP), a finura (F) de cada elemento, o teor de água (U) e a perda ao fogo (PF). Dos resultados indicados na Tabela 3 é possível observar que as amostras contendo CBCA apresentaram um menor volume em sua composição, assim como nos estudos de Kazmi et al. (2017), uma vez que esta grandeza é inversamente proporcional a DP (Aprianti et al., 2016). Logo, para a CCE, menor valor de DP encontrado, o volume é dez vezes maior do que seria caso não houvesse a substituição, estando de acordo com Gluitz e Marafão (2013), e que influenciará a resistência das argamassas como será visto adiante.

Tabela 3. Caracterização física dos elementos utilizados

Amostra	DP (g/cm ³)	F	U	PF
Cimento	2,73	3,14%	-	-
CCE	0,25	52,63%	6,59%	70,20%
CCA	0,55	78,67%	1,81%	5,79%
CBCA	0,84	31,72%	0,60%	11,65%

Além disso, a partir da DP pode-se compreender o processo de acomodação das partículas que compõem o sistema cimentício, quando fortemente entrelaçadas e com poucos vazios, tem-se um melhor desempenho mecânico. Nesse sentido, os melhores resultados de resistência deverão ser vistos na CBCA e CCA, pois após serem previamente tratadas – moídas e peneiradas – as amostras apresentaram maior DP. Sem esse tratamento para a CCE, a resistência ou outra propriedade da argamassa poderia ser afetada de maneira negativa, tornando inapta a substituição do cimento pelas cinzas, por exemplo (Martirena e Monzó, 2017; Farinha et al., 2018).

Todavia, sabendo-se que o comportamento de uma argamassa é regido por outras propriedades, a moagem e o peneiramento poderiam deixar as cinzas altamente reativas como comprova Roselló et al. (2017), e com a atividade pozolânica ocorrendo, o desempenho mecânico do sistema pode ser satisfatório. Então, analisando-se os resultados para o índice de finura e seguindo as especificações da ASTM C 618-19, a CBCA é de fato uma pozolana, o teor máximo de material retido na peneira 45 μm é de 34%, ante os 31,72% acumulados. Para NBR 12653 (ABNT, 2014) nenhuma das cinzas seriam um material pozolânico, o teor máximo é de 20%.

Entretanto, mesmo não sendo pozolanas dentro dos limites estabelecidos pelas normatizações vigentes, as menores partículas, ou seja, o pouco material passante na peneira 45 μm , se concentram perto da interface agregado e matriz de cimento, causando efeito de preenchimento de vazios ou efeito fíler, e que podem contribuir com ganho de resistência no estado endurecido (Khan et al., 2017; Aprianti et al., 2016; Resende, 2013). Esse fenômeno é o mesmo observado em sistemas cimentícios contendo cal hidráulica.

Enquanto, para a argamassa no estado fresco, o índice de finura revela que aqueles de menor valor, no caso CBCA, não há alteração na trabalhabilidade para nenhuma faixa de substituição, isto porque, partículas maiores que 45 μm afetam a plasticidade da mistura (Netto, 2006). Analogamente, para as CCA, tem-se uma maior perda de trabalhabilidade, principalmente quando do aumento de 15 para 30% de substituição do cimento. Assertivas igualmente comprovadas pelo índice de consistência que estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 2016), Figura 1.

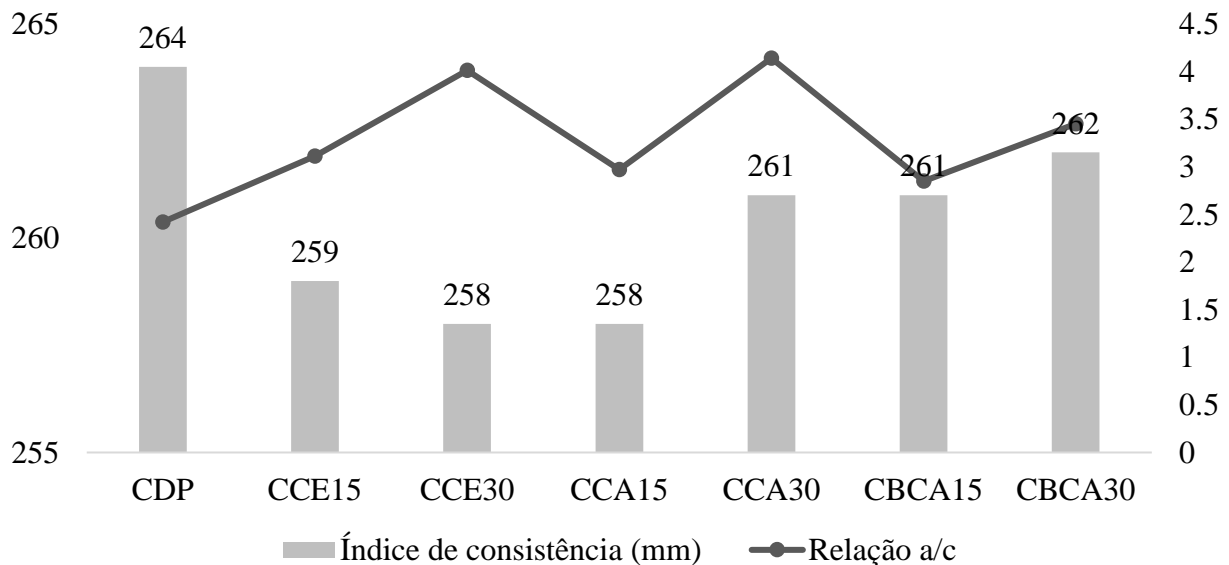


Figura 1. Resultados para índice de consistência e relação a/c.

Do ensaio de índice de finura foi possível realizar também uma análise visual das amostras retidas na peneira. Para as CCE, aplicando-se o hexametáfosfato de sódio, composto químico dispersante (Mauri et al., 2011), notou-se a presença de pequenos cristais. Estas partículas respondem pelo alto

teor de água na amostra, Figura 1, em função da elevada capacidade de absorção (Netto, 2006). Justificando não só o acentuado volume de água, que favorece a manutenção da trabalhabilidade (Ataie, 2016), como a umidade, que é satisfatória durante a cura da argamassa (Rajamma et al., 2009).

E devido à natureza higroscópica desses elementos cristalinos, com mais água liberada, tem-se uma maior perda de massa da CCE quando submetida ao teste de perda ao fogo, por isso os 70,20% de perda, a maior dentre as cinzas analisadas. Além disso, essa ocorrência se dá, também, pela presença de matéria orgânica não queimada (Prasara-a, 2017), que durante o aquecimento em mufla, libera mais uma parcela de CO₂ e água.

De todo modo, a presença desses cristais não é favorável às propriedades da argamassa. Para Aprianti et al. (2016), os elementos em forma amorfa são mais reativos. No entanto, em virtude de que grande parte do material retido seja cristalino e que a sua finura atingiu um valor de 52,63%, é possível que o restante da amostra, material passante e amorfo, tenha compensado a reatividade da cinza. Com isso, para a CCE, o considerável ganho de resistência é função do volume de cinza adicionado a argamassa devido a sua baixa DP, como indicado anteriormente.

E no que diz respeito a demanda de água nas amostras, utilizando-se do índice de consistência, Figura 1, em relação ao CPD, há uma elevada quantidade de água para as misturas que contenham cinzas em substituição parcial ao cimento, exceto para a CBCA. A maior quantidade requerida foi para o traço CCA30 com 20% a mais quando comparado ao CPD. Segundo Ukrainczyk et al. (2016), isso ocorre por causa da forma irregular e volumosa das cinzas. Berra et al. (2015) evidenciam a elevada área superficial específica das cinzas em comparação ao cimento Portland, além da natureza porosa de suas partículas, como sugerido por Arif et al. (2016).

Essas características são outros fatores que igualmente respondem por uma maior absorção de água. Bem como, a presença de grande quantidade de matéria orgânica disponível para hidratação durante o endurecimento da argamassa, conforme identificado por Rajamma et al. (2009) e confirmado anteriormente pelo ensaio de perda ao fogo. Percebe-se, portanto, que a trabalhabilidade diminuiu quando da presença de cinzas em substituição parcial ao cimento, corroborando com os resultados obtidos por Belviso (2018), Aprianti et al. (2016), Ukrainczyk et al. (2016) e aqueles aqui abordados.

Apesar disso, a diminuição encontrada foi de 2,3% ante os 34,4% detalhada na literatura. Essa diferença se deu devido ao tamanho das partículas selecionadas, Ukrainczyk et al. (2016), por exemplo, utilizaram materiais com partículas de até 80 µm. Neste estudo, optou-se por aquelas com diâmetro máx. de 75 µm, valor considerado satisfatório por Ataie e Riding (2016) para assegurar reatividade, que é inversamente proporcional a densidade da partícula, e, portanto, influenciam positivamente as propriedades mecânicas da argamassa.

De modo geral, considerando as análises para a CCE, que são inversas as observadas nas CBCA e CCA, e seguindo os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), somente as duas últimas podem ser classificadas como pozolanas de classe N, para teor de água, umidade e perda ao fogo. Ambas atingiram teor de umidade menor que 3% e não ultrapassaram em 10% o valor de perda ao fogo. E somando-se o comportamento das cinzas ante as propriedades da argamassa no estado plástico, trabalhabilidade e absorção de água, é previsto uma melhor reatividade nas amostras contendo CCA.

Então, no que se refere aos resultados propriamente dito, não houve ganho significativo de resistência à compressão aos 14 dias para nenhuma das amostras, Figura 2, tal como em Paris et al. (2016) e Abbas et al. (2017). Os CPD com teor de 15% de substituição de cimento conseguiram melhor desempenho mecânico, em especial para a CCE15. Isso está relacionado a fatores destacados como o menor índice de substituição do cimento (Garcia e Sousa-Coutinho, 2013; Carrasco et al., 2014; Ukrainczyk et al., 2016), a maior quantidade de material reativo, a melhor trabalhabilidade, quando se comparada a CDP, e a maior absorção de água.

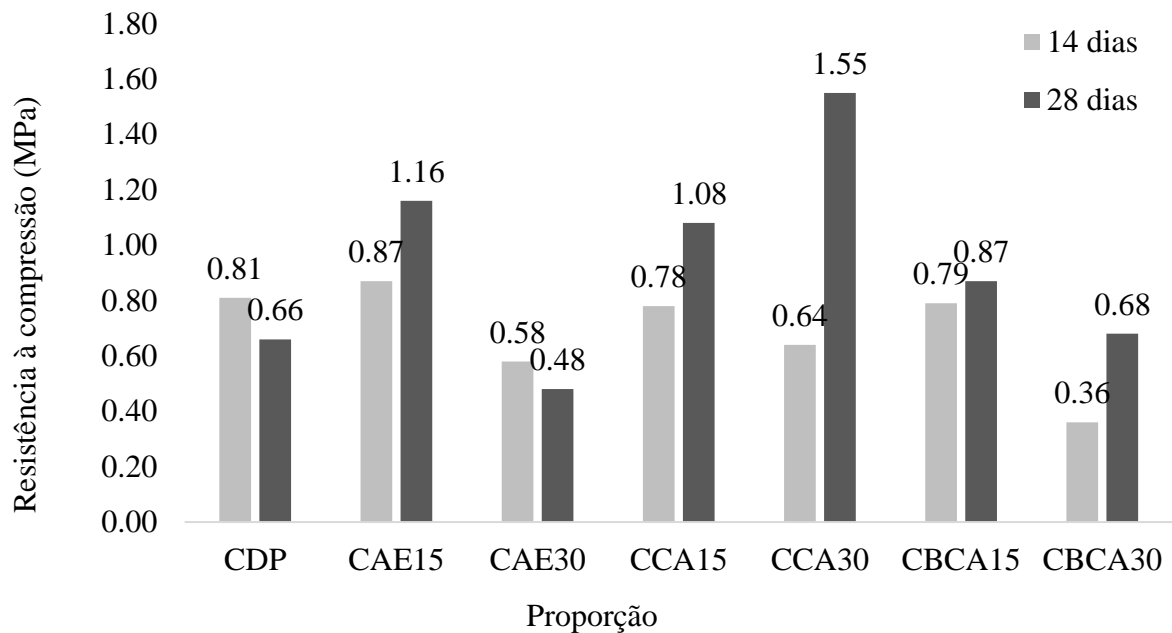


Figura 2. Comparativo entre a resistência média alcançada no ensaio de compressão simples para cada traço aos 14 e 28 dias (Método de Tukey $p < 0,05$).

A causa do mal desempenho dos CPD é justificada pela não ocorrência do efeito sinérgico entre a hidratação do cimento e a reação pozolânica, que influencia diretamente a resistência à compressão da argamassa (Isaia, 2003; Berra et al., 2015). De um lado a má ação de hidratação, possivelmente decorre da utilização de fôrmas de madeira para moldagem dos CDP, um material de natureza permeável, e a pouca retenção de água durante a cura, como esperado. Do outro, a reação cinza-cimento lenta, Carrasco et al. (2014) e Rosales et al. (2017), sugerem que são necessários longos períodos para que haja efeitos considerados positivos na resistência à compressão.

Aos 28 dias, o CCE30 não apresentou ganho de resistência, as causas são as mesmas apontadas para a CCE15 aos 14 dias. Confirmando que as cinzas tendem a contribuir para o desenvolvimento da resistência mecânica em razão da sua pozolanicidade e atividade hidráulica, tal como em Berra et al. (2015). Os melhores resultados foram obtidos para amostras com um teor de 15% e para a CCA30, esses também foram identificados por Rajamma et al. (2009) e Wang (2015). Na CCA30, a amostra com maior ganho de resistência, é função da elevada quantidade de sílica em sua composição (Fernandes et al., 2016), Tabela 1, que podem reagir mais facilmente com o CH liberado, aumentando a resistência das argamassas (Jamil et al., 2016).

Com isso, pode-se afirmar que, mesmo sem ganho significativo de resistência à compressão, a substituição parcial de cimento por cinzas de biomassa foi considerada aceitável para 15% em massa. Os resultados identificados na Figura 2 e aqueles encontrados por Rajamma et al. (2015), Garcia e Sousa-Coutinho (2013), Carrasco et al. (2014) e Ukrainczyk et al. (2016), apontam que a resistência das amostras contendo cinzas é maior que a encontrada nos CPD para tempos de curas diferentes, isto é, 28 dias para aqueles contendo o resíduo de biomassa e 90 dias para aqueles sem nenhuma adição de material cimentício suplementar.

De forma análoga, analisando os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão, Figura 3, foi observado que apenas os traços CBCA30 e CCA30 não superaram a resistência do CPD e que para CCE30 um mesmo valor aos 14 dias foi atingido. Para a idade de 28 dias, os traços contendo cinzas obtiveram melhor desempenho para a resistência à tração na flexão do que para a compressão simples, confirmando o efeito retardatário das reações cinza-cimento, principalmente para uma substituição de 15%.

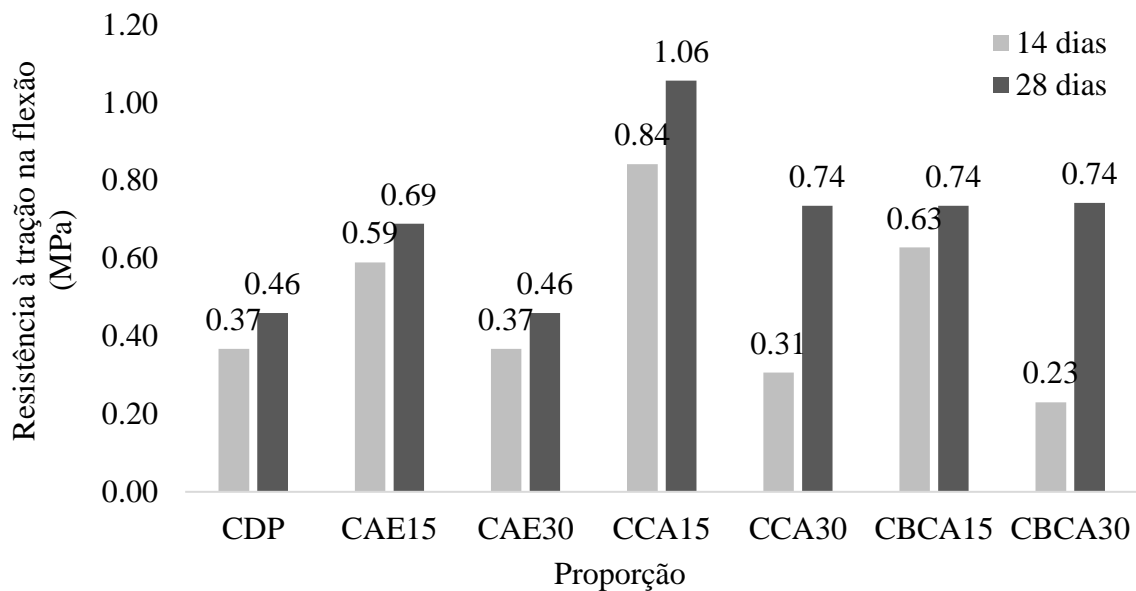


Figura 3. Comparativo entre a resistência média alcançada no ensaio de tração na flexão para cada traço aos 14 e 28 dias (Método de Tukey $p < 0,05$).

Contudo, os resultados para flexão divergem daqueles obtidos por Rajamma et al. (2009), onde houve uma redução gradual da resistência com o aumento da porcentagem de cinza e, conseqüente aumento das reações pozolânicas, principalmente, para taxas de substituição maiores que 20% (Chowdhury et al., 2015). Esse fenômeno pode ser controlado com a requieima dos resíduos e processos de moagem, como foi feito para as cinzas aqui estudadas, confirmando-se a necessidade de se as submeter a estes tipos de pré-tratamentos, tal como indicado por Jamil et al. (2016). Por último, para identificar o fenômeno de absorção da água, seguiu-se as especificações apresentadas pela NBR 15259 (ABNT 2005). Nela consta que o índice de absorção por capilaridade deve ser calculado como a média dos três corpos de prova submetidos à imersão em água por 10 min e 90 min, Figura 4.

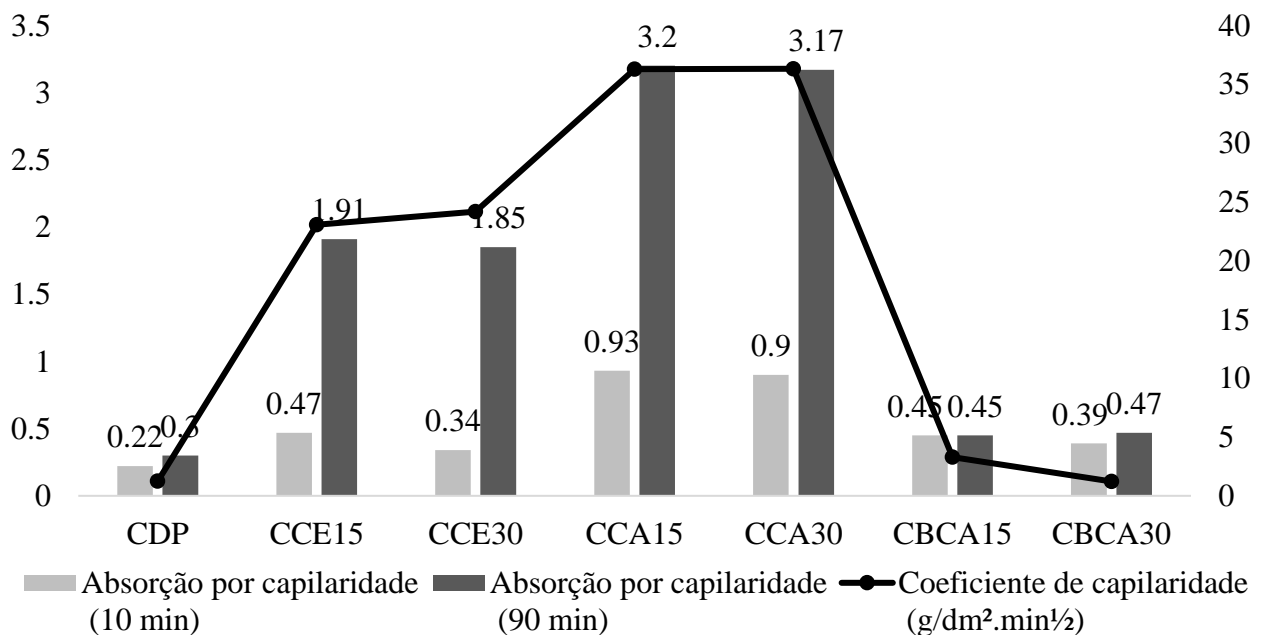


Figura 4. Ensaio de absorção aos 28 dias.

A partir dos resultados encontrados percebe-se que a taxa de absorção diminui, mesmo que inexpressivamente, à medida que se aumenta a taxa de substituição do cimento de 15 para 30%. Tal como apresentado por Jamil et al. (2016), Elinwa e Ejeh (2003), que identificaram uma redução da absorção de água, quando da adição de cinzas a uma taxa de 15% em argamassas, com um valor médio de aproximadamente 0,8% e 1,25%, abaixo dos 10% aceito para materiais de construção. Divergindo, porém, dos estudos de Chowdhury et al. (2015), no qual a relação absorção e adição de cinzas é diretamente proporcional.

Para os maiores valores, CCE30 e CCE15, eles se deram em virtude da presença de poros abertos na estrutura, confirmando os resultados para os ensaios de granulometria e índice de finura. Na presença de partículas com tamanhos diversos, aumenta-se a capacidade de absorção de água. Logo, por razão da uniformidade e finura das CBCA, a penetração de água nessas apresentam valores próximos aos dos CPD. Com isso, conclui-se que a absorção diminui à medida que a quantidade de vazios diminui, assim, a CBCA pode ser utilizada como material de preenchimento. Torna-se claro, também que, aumentando-se os percentuais de cinzas, os vazios permeáveis serão preenchidos, minimizando a taxa de absorção (Jamil et al., 2016; Rosales et al., 2017; Carrasco et al., 2014).

Sobre a cura, segundo Aprianti et al. (2016), quando da incorporação de material fino em sistemas cimentícios, deve-se fazer o uso de diferentes procedimentos para promover essa hidratação do concreto. Uma opção é a utilização de superplastificantes (Ukrainczyk et al., 2016), com o intuito de fixar a relação a/c e garantir condições de execução e desempenho (Carasek, 2010). Para Ramos et al. (2013), Ataie e Riding (2016) o valor ideal da relação a/c equivale a 0,4 e 0,45, respectivamente.

Diante disso, a cinza com maior potencial para melhorar as características das argamassas como substituta parcial do cimento é a CCA. Quanto a CCE e CBCA, deve-se avaliar o seu potencial como material de preenchimento. E ainda uma possível utilização de uma mistura contendo mais de um tipo de cinza.

4. CONCLUSÃO

Aplicada as cinzas nas matrizes cimentícias, ficou evidente a viabilidade de uso como um material cimentício suplementar, os critérios técnicos analisados são atestados por aqueles encontrados na literatura. Os pré-tratamentos reduziram a variação granulométrica das cinzas, aumentando a sua superfície específica, e as partículas estando melhor acomodadas, apresentaram maior reatividade. O teor de matéria orgânica não queimada influenciou a perda de massa ao fogo, mas não o suficiente para impedir melhores resultados no estado endurecido quando se comparados a argamassa de referência.

Cabe destacar que, de todas as análises feitas, as argamassas contendo CCA obtiveram o melhor desenvolvimento mecânico. O comportamento das CCE e CBCA sugere a sua aplicação como substituto da areia, por exemplo, podendo ser objeto de estudo em pesquisas futuras, o efeito de preenchimento foi identificado pelo ganho de resistência que ocorreu devido ao comportamento das partículas, semelhantes às da cal, ocupando vazios da matriz cimentícia. Contudo, não se deve descartar a sua utilização como substituto do cimento.

Quanto ao teor de substituição, para as faixas escolhidas, 15% é o teor de substituição ideal, contudo, maiores teores de substituição podem implicar em argamassas com menor resistência mecânica ou mais porosas. A referência deve ser, portanto, a aplicação da argamassa, se de assentamento ou revestimento, se área externa ou interna. Aquelas aqui estudadas, em função do seu traço, 1:1:6, e dos resultados obtidos, poderiam ser utilizadas para assentamento de alvenaria ou para revestimento cerâmico. Todavia, a viabilidade técnica para essas aplicações só pode ser comprovada realizando-se novos estudos.

E em se tratando da absorção de água, que foi elevada para todos os teores de cinzas, a argamassa é altamente porosa. A sugestão é que sejam realizadas após o peneiramento e moagem a requieima da cinza, melhorando a atividade pozolânica, diminuindo a quantidade de vazios na matriz cimentícia, ou ainda, a utilização de aditivos para controle da relação a/c.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa (Projeto número 552118 / 2011-7).

6. REFERÊNCIAS

- Abbas, S., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J. (2017), *Potential of rice husk for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates*. Construction and Building Materials. 132:61-70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.126>
- Aprianti, E., Shafiqh, P., Zawawi, R., Hassa, Z. F. A. (2016), *Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials*. Construction and Building Materials. 107:365-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.100>
- Arif, E., Clark, M. W., Lake, N. (2016), *Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Application in cement and mortar production*. Construction and Building Materials. 128:287-197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μ (nº 200)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). *NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR NM 24: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *NBR NM 18: Análise química – Determinação da perda ao fogo*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 15894-3: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2005). *ASTM C 204-05 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*. <https://doi.org/10.1520/10.1520/C0204-05>
- ASTM International. (2009). *ASTM C 206-03 Standard Specification for Finishing Hydrated Lime*. <https://doi.org/10.1520/C0206-03R09>

- ASTM International. (2013). ASTM D 7348 – 13 *Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues*. <https://doi.org/10.1520/D7348-13>
- ASTM International. (2017). ASTM D3173 / D3173M - 17a *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. <https://doi.org/10.1520/C0204-05>
- ASTM International. (2019). ASTM C 1315-19 *Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds Having Special Properties for Curing and Sealing Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C1315-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 270-19ae1 *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. <https://doi.org/10.1520/C0270-19AE01>
- ASTM International. (2019). ASTM C 309-19 *Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0309-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 618-19 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 618-19 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2020). ASTM C 150M-20 *Standard Specification for Portland Cement*. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-20
- Ataie, F. F., Riding, K. A. (2016). *Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption*. Construction and Building Materials. 106:274-281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091>
- Belviso, C. (2018), *State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues*. Progress in Energy and Combustion Science. 65:109-135. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.004>
- Berenguer, R. A., Silva, F. A. N., Torres, S. M., Monteiro, E. C. B., Helene, P., Neto, A. A. de M. (2018), A influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa. Revista ALCONPAT. 8(1):30-37. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>
- Berra, M., Mangialardi, T., Paolini, A. E. (2015). *Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials*. Construction and Building Materials, 76:286-296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052>
- British Standard (2002). BS EN 1015-18 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*.
- British Standard (2019). BS EN 1015-11 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.
- Campos, M. O. (2014), “*Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto*”. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, p. 321.
- Carasek, H. (2010), Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). “*Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*”. IBRACON, São Paulo, p.1-37.
- Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., Pérez, L. (2014), *An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks*. Fuel Processing Technology. 118:272-280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- Chatveera, B., Lertwattanakul, P. (2014), *Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash*. Journal of Environmental Management. 133:365-373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.010>
- Chowdhury, S., Mishra, M., Suganya, O. (2015), *The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview*. Ain Shams Engineering Journal. 6 (2):429-437. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>
- de Souza, L. M. S., Fairbairn, E. M. R., Filho, R. D. T., Cordeiro, G. C. (2014), *Influence of initial*

- CaO/SiO₂ ratio on the hydration of rice husk ash-Ca(OH)₂ and sugar cane bagasse ash-Ca(OH)₂ pastes.* Química Nova. 37 (10):1600-16605. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140258>
- Dubaj, E. (2000), “*Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre*”. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 115.
- Elinwa, A. U., Ejeh, S. P. (2003), *Effects of incorporation of sawdust incineration fly ash in cement pastes and mortars.* Asian Architecture Build Eng. 3:1-7. <http://dx.doi.org/10.3130/jaabe.3.1>
- Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares D., Silva, A. S., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2012), *Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars.* Construction and Building Materials. 26:687-693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075>
- Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Moraes, C. A. M., Rocha, T. L. A. C., Brehm, F. A., Modolo, R. C. E. (2016), *Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy.* Fuel Processing Technology. 165:351-359. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.086>
- Garcia, M. L., Sousa-Coutinho, J. (2013), *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash.* Construction and Building Materials. 41:897-910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081>
- Gluitz, A. C., Marafão, D. (2013), “*Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa*”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p. 53.
- Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M. K., Zain, M. F. M. (2016), *Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review.* Construction and Building Materials. 116:128-140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147>
- Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., Moraes, R. (2003), *Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.* Cement and Concrete Composites. 25:69-76. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00057-9)
- Jamil, M., Khan, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A. B. M. A., Zain, M. F. M. (2016), *Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar.* Construction and Building Materials. 128:185-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Patnaikuni, I., Wu, F. (2017), *Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction.* Construction and Building Materials. 148:231-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025>
- Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., Kaish, A. B. M. A. (2017), *Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar.* Journal of Civil Engineering. 21:274-284. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0737-5>
- Martirena, F., Monzó, J. (2017), *Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials.* Cement and Concrete Research. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>
- Mauri, J., Ruiz, H. A., Raphael, B. A. F., Ker, J. C., Rezende, L. R. M. (2011), *Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos.* Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34:1277-1284. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400021>
- Modolo, R. C. E., Silva, T., Senff, L., Tarelho, L. A. C., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Silva, L. (2015), *Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars.* Fuel Processing Technology. 129:192-202. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.015>
- Netto, R. M. (2006), “*Materiais pozolânicos*”. Dissertação Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, p.149.
- Noor-Ul-Amin, S. (2014), *A multi-directional utilization of different ashes.* Royal Society of Chemistry Advances. 4(107):62769-62788. <https://doi.org/10.1039/C4RA06568A>
- Prasara-a, J., Gheewala, S. H. (2017), *Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review.* Journal of Cleaner Production. 167:1020-1028.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>

Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C., Allen, G. C., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M. (2009), *Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials*. Journal of Hazardous Materials. 172(2-3):1049-1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>

Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, J. A., Ball, R. J., Aleen, G. C., Ferreira, V. M. (2015), *Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement-based materials*. Composites Part B: Engineering. 77:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.019>

Ramos, T., Matos, A. M., Sousa-Coutinho, J. (2013), *Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion*. Construction and Building Materials. 49:343–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>

Resende, D. S. (2013), “*Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar*”. Tese Doutorado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 168.

Rosales, J., Cabrera, M., Beltrán, M. G., López, M., Agrela, F. (2017), *Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars*. Journal of Cleaner Production. 154:424-435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024>

Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J.L., Monzó, J., Payá, J. (2017), *Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems*. Industrial Crops and Products. 103:39-50. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>

Salvo, M., Rizzo, M. C., Novajra, G., Canonico, F., Bianchi, M., Ferraris, M. (2015), *Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM)*. Advances in Applied Ceramics. 114:S3-S10. <https://doi.org/10.1179/1743676115Y.0000000043>

Ukrainczyk, N., Vrbos, N., Koenders, E. A. B. (2016), *Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials*. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 30(2):137-148. <http://dx.doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>

Wang, S. (2015), *Cofired biomass fly ashes in mortar: Reduction of Alkali Silica Reaction (ASR) expansion, pore solution chemistry and the effects on compressive strength*. Construction and Building Materials. 82:123-132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.021>

Xu, W., Lo, Y. T., Ouyang, D., Memon, A., Xing, F., Wang, W., Yuan, X. (2015), *Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste*. Construction and Building Materials. 89:90-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030>

Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołbiowski, W., Szczepanik, M. (2018), *Chemical Characteristics of Biomass Ashes*. Energies. 11(11):2-15. <https://doi.org/10.3390/en11112885>

Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento

S. M. M. Pinheiro¹ , M. P. Costa Junior^{1*} 

* Autor de Contato: milton.paulino@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

Recepção: 11/09/2020 | Aceitação: 11/03/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O objetivo desse trabalho é verificar a relação entre a ação de carregamentos induzindo fissuras e a durabilidade do concreto armado. Foram produzidos corpos-de-prova prismáticos e durante o período de dois anos estas amostras foram submetidas à névoa salina artificial, estando sob a ação de carregamento central permanente, carregamento central de curta duração e sem carregamento (referência), sendo realizados ensaios de penetração de cloretos e análise microestrutural, além do mapeamento das fissuras. Verificou-se que o carregamento não influenciou nos resultados de penetração de cloretos, porém, nas micrografias e microanálises das amostras fissuradas observou-se a formação de produtos de deterioração e possíveis microorganismos, em comparação aos corpos-de-prova que não sofreram carregamento.

Palavras-chave: durabilidade; carregamento; fissura; cloretos; microscopia.

Citar como: Pinheiro, S. M. M., Costa Junior, M. P. (2021), “Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 17 – 37, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor M.P.Costa Junior contribuiu com a ideia original, coleta de dados, metodologia experimental, discussão dos resultados e redação do trabalho. O autor S.M.M. Pinheiro contribuiu com análise microestrutural e revisão do texto.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Durability analysis of reinforced concrete with loading induced cracks

ABSTRACT

The objective of this study is to verify the relationship between the action of loads inducing cracks and the durability of reinforced concrete. Prismatic specimens were produced and for two years these samples were subjected to artificial salt spray, under the action of different types of loading and unloaded (reference), with moist curing for 7 days. Chloride penetration tests and microstructural analysis were carried out. It was observed that loading did not influence the results of chloride penetration. However, it was observed that in the micrographs and microanalysis of the cracked samples the clearer formation of deterioration products and possible microorganisms, compared to the samples that did not suffer loading.

Keywords: durability; loading; cracking; chlorides; microscopy.

Análisis de durabilidad del hormigón armado con fisuras inducidas por la carga

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es verificar la relación entre la acción de cargas que inducen fisuras y la durabilidad del hormigón armado. Fueron producidos modelos de prueba (especímenes) prismáticos y durante dos años estas muestras fueron sometidas a niebla salina artificial, bajo la acción de una carga central permanente, carga central a corto plazo sin carga (referencia), con un curado de 7 días. Se realizaron pruebas de penetración de cloruros y análisis microestructurales, además del mapeo de fisuras. Se encontró que la carga no influyó en los resultados de penetración de cloruros, sin embargo, se observa que las micrografías y microanálisis muestran una formación de productos de deterioro y posibles microorganismos, en comparación con las probetas que no sufrieron carga.

Palabras clave: durabilidad; carga; craqueo; cloruros; microscopía.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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

As causas do processo de deterioração do concreto armado estão diretamente relacionadas a ação dos agentes agressivos. Dentre os vários agentes existentes (dióxido de carbono, íons cloreto e ataque de sulfatos), estão à ação deletéria dos cloretos e do dióxido de carbono (CO_2), que têm sido muito estudados nos últimos anos e que ainda são um grande desafio para o bom desempenho das estruturas de concreto armado. Assim, as estruturas que estão expostas ao ambiente marinho e ao urbano demandam uma qualidade mínima do material para assegurar sua vida útil de projeto e sua durabilidade (ANDRADE, 2005; CASCUDO, 2005; SILVESTRO et.al., 2021).

Além das causas químicas, ressaltam-se também as causas do processo mecânico de deterioração como a sobrecarga e as cargas cíclicas; cujo principal sintoma é a fissuração do concreto. Essas fissuras devem ser controladas, principalmente por três motivos: durabilidade por risco de corrosão da armadura, aparência estética e exigências funcionais como higiene (proliferação de fungos, micro-organismos, etc.) e permeabilidade a gases e à água (GHALI and FAVRE, 1994; HEARN and FIGG, 2001).

Em condições naturais de exposição, a durabilidade do concreto é controlada pela sua habilidade de impedir o transporte de íons e fluidos. Muitas vezes o concreto está sujeito a vários tipos de sollicitação (térmica, mecânica, etc) que geram tensões de tração que excedem a resistência do material gerando fissuras, que podem afetar o transporte de agentes agressivos à mistura (LIM et al, 2000; HEARN and FIGG, 2001; MEHTA and MONTEIRO, 2014).

Fissuras manifestadas devido à ação de cargas externas podem agir como um fator importante para a entrada de agentes agressivos como íons cloreto e o CO_2 (carbonatação). Porém, estudos mostram que as fissuras não são o maior fator para deterioração da estrutura por corrosão (entrada de agentes agressivos) se elas não excederem aberturas estipuladas pelas normas internacionais e NBR 6118 (ABNT, 2014). Neste caso, a qualidade do concreto de cobrimento e o próprio cobrimento nominal são mais relevantes para a sua durabilidade (KONIN et.al., 1998; HELENE and DINIZ, 2001; ALEXANDER et al, 2001; CASCUDO, 2005).

Independente de carregamento, as características das fissuras (conectividade, abertura, largura, comprimento) exercem um papel fundamental na durabilidade das estruturas de concreto. Nesse sentido, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece abertura máxima característica para fissuração (identificado na norma como W_k) e proteção das armaduras quanto à durabilidade. Essa norma define a abertura máxima de fissuras de 0,4mm para concreto armado, que varia em função da classe de agressividade ambiental, do tipo de estrutura de concreto e as combinações de ações de serviço.

A penetração e difusão de íons cloretos podem ocorrer pela fissura conforme esquematizado na Figura 1.

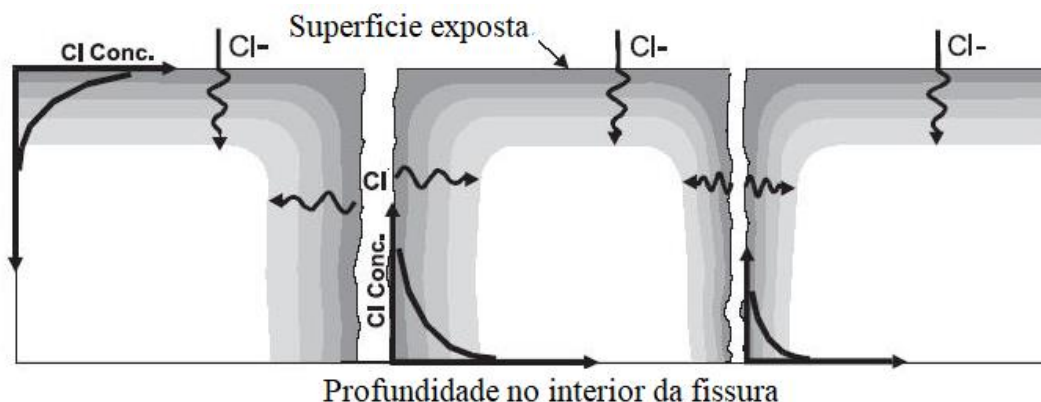


Figura 1. Penetração de cloretos na superfície e entre as fissuras (ISMAIL et.al., 2006).

As fissuras agem como porta de entrada para agentes agressivos, que acarretam um efeito significativo sobre a difusão de cloretos, pois facilitam o deslocamento desses agentes através do concreto, sendo a sua intensidade diretamente dependente abertura das fissuras (WANG et.al., 2016).

Quando os íons cloreto estão no interior da fissura, eles podem penetrar em diferentes profundidades, a partir da superfície no seu interior, ficando dissolvidos na fase aquosa dos poros, formando os cloretos livres, que podem desencadear o processo de deterioração do material. Observa-se também que a concentração de cloretos é alta na superfície exposta do concreto, porém, ao penetrar na abertura de fissura ela diminui com o aumento da profundidade a partir da superfície do material (ISMAIL et.al., 2006; FIGUEREDO, 2005; WIN et.al., 2004).

Além dos cloretos livres nas soluções dos poros do concreto, pode-se encontrá-los também: combinados quimicamente ao C-S-H, ou como cloroaluminatos, adsorvidos fisicamente às paredes dos poros ou livres nas soluções dos poros do concreto (ROMANO, 2009; CRAUSS, 2010).

Dos íons cloreto que penetram no concreto, parte liga-se ao aluminato tricálcico (C_3A) formando principalmente cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel - $C_3A.CaCl_2.10H_2O$, o qual se incorpora às fases do cimento hidratado. Outra parte é absorvida na superfície dos poros e o restante fica dissolvido na fase aquosa dos poros, que formam os cloretos livres que são perigosos e causam danos à estrutura (HELMUTH and STARK, 1992; FIGUEREDO, 2005; CRAUSS, 2010).

De modo geral, sempre haverá um estado de equilíbrio entre as três formas de ocorrência desses íons, de forma que sempre existirá certo teor de Cl^- livre na fase líquida do concreto (HELMUT and STARK, 1992; FORTES and ANDRADE, 1995; CASCUDO, 1997). Cimentos com baixos teores de C_3A têm menor capacidade de imobilizar íons cloreto pela formação do cloroaluminato de cálcio hidratado. Com a formação desse composto há uma diminuição da concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto.

A penetração dos cloretos na forma de cloretos livres depende de fatores como o tipo de íons positivos (cátions) associados aos cloretos, o momento de acesso ao concreto antes ou após seu endurecimento, a presença de outro íon negativo (ânion) como o sulfato, o tipo de cimento usado na produção de concreto, a qualidade de produção e cura do concreto, a umidade ambiente, a relação água/cimento, o estado de carbonatação e o consumo de cimento por m^3 de concreto. Analisando a resistência à penetração de íons cloreto, Leng et.al. (2000) e Oh et.al. (2002) verificaram que a difusão de íons cloreto aumenta com o aumento da relação água/cimento, e cimentos com cinzas volantes e escória de alto forno têm alta resistência à difusão (HELENE, 1997; SONG et.al., 2008; LAWRENCE, 2006).

Nesse contexto, esse artigo apresenta uma análise da durabilidade em concreto armado sob diferentes condições de carregamento, durante o período de 24 meses. Foram analisados profundidade de penetração de íons cloretos, além da análise microestrutural.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental foi conduzido com as seguintes etapas: caracterização dos materiais, dosagem dos corpos-de-prova. Após a dosagem foram moldados dois tipos de corpos-de-prova (prismáticos e cilíndricos).

Após moldagem e desforma, os corpos-de-prova prismáticos passaram por cura úmida durante 7 dias, sendo então aplicados diferentes tipos de carregamentos e submetidos a névoa salina, em ambiente natural até as datas de ensaios (idades de 6, 12, 18 e 24 meses). Nessas idades foram avaliadas as profundidades de cloretos e realizada a Análise microestrutural (MEV e EDS).

Quanto aos corpos-de-prova cilíndricos, após moldagem eles foram desformados e curados (cura úmida) por 28 dias. Finalizado esse período, foram realizados ensaios de resistência compressão

axial.

O trabalho finalizou com a análise dos resultados e considerações finais. Todas essas etapas serão mais detalhadas a seguir.

Quanto aos materiais, o cimento Portland utilizado nesse trabalho foi o CP III 40-RS (cimento Portland de Alto-Forno), cujo teor de escória granulada de alto-forno no cimento pode chegar a 75%. Foram utilizados os seguintes materiais para composição da mistura: areia (média) de rio, disponível e utilizada na região de Campinas – SP, pedra britada 9,5/25 (B1 - basalto) com dimensão máxima característica de 19mm e aditivo polifuncional a base de lignosulfonato, com massa específica de 1,18 g/cm³. Na produção dos corpos-de-prova prismáticos de concreto foi utilizada uma barra de aço CA50 com diâmetro nominal de 10 mm.

As misturas experimentais escolhidas em função da dosagem do concreto utilizado nesta pesquisa, cuja proporção adotada aglomerante:agregados foi de 1:5 em massa. Neste sentido, atendendo a esse requisito, o traço adotado foi de 1:2:3 (cimento:areia:brita) (em massa), com a relação água/cimento de 0,42.

A escolha da proporção cimento: areia: brita de 1:2:3 ocorreu por apresentar bom teor de argamassa. A relação água/cimento de 0,42 foi adotada com o objetivo de obter concretos mais resistentes quando expostos em meios agressivos, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). A classe adotada para os concretos moldados neste estudo foi C50. O traço e a relação água/cimento adotados neste trabalho vêm sendo utilizados e avaliados desde 2000 dentro do projeto de pesquisa sobre durabilidade da camada de cobertura, no laboratório de materiais de construção da Unicamp.

A quantidade de aditivo utilizado foi a necessária para se manter uma trabalhabilidade adequada à moldagem dos corpos-de-prova em mesa vibratória, em função da baixa relação água/cimento empregada. O índice de consistência, determinado pelo ensaio de abatimento (de 4 ± 1 cm), foi encontrado por meio de um tronco de cone (conforme a NBR 16889, 2020). Esse valor de abatimento, apesar de não ser muito utilizado em obras correntes, foi adotado para o concreto, pois se desejava obter uma trabalhabilidade mínima em que o concreto fosse moldado para a produção de corpos-de-prova prismáticos com a vibração mecânica.

O consumo de materiais empregados para a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1. Especificação dos materiais utilizados no trabalho experimental.

	Cimento (Kg/m³)	Aditivo (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Brita (Kg/m³)	Água (Kg/m³)
1 : 2 : 3 : 0,42	398	2,4	796	1194	167

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, empregados para caracterização do concreto, avaliando a sua propriedade mecânica (resistência à compressão axial) (Tabela 2).

Tabela 2. Série de corpos-de-prova cilíndricos.

Séries	Tipo de cura	Data de ensaio
M6um	Imersa até a data de ensaio	28 dias
M12um		
M18um		
M24um		

A mistura utilizada foi mecânica, em betoneira de eixo inclinado. Para cada série foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e ensaiados na idade de 28 dias, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos-de-prova foram moldados em duas camadas,

em mesa vibratória, no tempo necessário para permitir a compactação adequada do concreto no molde, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos com lona plástica até o momento da desforma, que ocorria após 48 horas do momento da moldagem. Esse prazo de desmoldagem foi adotado em função da desforma dos corpos-de-prova prismáticos. Em seguida, os corpos-de-prova foram submetidos à cura imersa por 28 dias.

Foram moldados 6 corpos-de-prova prismáticos para cada idade (6, 12, 18 e 24 meses), sendo 2 corpos-de-prova da amostra sem carregamento, 2 corpos-de-prova da amostra sob carregamento central de curta duração e 2 corpos-de-prova da amostra sob carregamento central permanente, nas dimensões de 1,39x0,1x0,1m. Os moldes foram definidos nessas dimensões em função de serem as mesmas utilizadas em outras pesquisas realizadas no Laboratório de Materiais de Construção da Unicamp.

A mistura do concreto para a produção dos corpos-de-prova prismáticos foi mecânica em betoneira de eixo inclinado. Foi utilizada uma barra de aço CA50 com diâmetro nominal de 10 mm ($\varnothing 10$), com cobrimento nominal de 30 mm, embora a corrosão do aço não seja escopo deste trabalho. O cobrimento adotado (30 mm) foi definido em função do trabalho realizado por Martins (2001), além do trabalho de Midness e Young (1981), Illston (1994), Alexander et.al. (2001) e Figueiredo e Nepomuceno (2004).

Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados de dois em dois. Para manter o cobrimento foram colocados 3 espaçadores de 30mm ao longo da barra de aço. Na figura 2 pode-se observar as dimensões do corpo-de-prova prismático e posição da barra de aço.

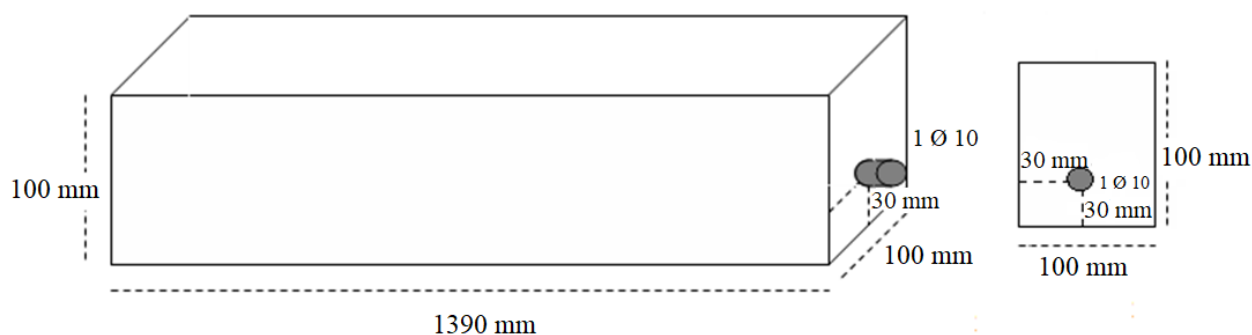


Figura 2. Esquema de dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.

Após a moldagem, os corpos-de-prova prismáticos permaneceram nas formas por 48 horas, cobertos com lona plástica. Esse prazo foi adotado porque não se conseguia desformar e principalmente transportar esses corpos-de-prova antes de 48 horas, pois fissuravam durante o manuseio.

Concluído esse prazo, eles passaram por cura úmida, onde foram imersos em água saturada de cal até a idade de 7 dias. Esse período foi definido baseado nas recomendações de Thomaz (2005), Castro (2003), Braun (2003) e ACI 308 (2016), que determinaram no mínimo 7 dias de cura, independente do tipo de cimento adotado. Além das referências citadas, a idade de 7 dias de cura foi adotada em função de ser esse o prazo utilizado nas obras brasileiras para a cura de peças estruturais.

Foi definida a forma de carregamento dos corpos-de-prova prismáticos, que teriam as seguintes situações:

- Sem carregamento (SC). Foi adotado para servir como referência na comparação entre os dois outros tipos de carregamento.
- Carregamento central de curta duração (CCCD). Aplicação de uma força concentrada P no corpo-de-prova prismático até o surgimento da primeira fissura, e retirada em seguida. Optou-se pela escolha desse carregamento para verificar o desempenho do concreto em

uma situação de fissuras que podem surgir ao longo da vida útil da estrutura devido à ação de carregamentos pontuais, ou seja, casos em que há uma sobrecarga de curta duração na estrutura, com o surgimento de fissura. Nesse caso, como o carregamento é de curta duração, a fissura pode desaparecer na retirada do carregamento, mas tensões e microfissuras internas no material já ocorreram;

- Carregamento central permanente (CCP). Os corpos-de-prova prismáticos sofreram carregamento até a data dos ensaios de durabilidade. Esse tipo de carregamento foi escolhido para que o corpo-de-prova prismático tivesse fissuras superficiais e que se mantivessem abertas ao longo de todo o período de exposição, até as datas de ensaio. Assim, nas datas de ensaio pode-se observar a influência da fissura na profundidade de penetração de cloretos e na microestrutura do concreto.

Para a abertura máxima de fissuras, foi adotado como parâmetro o limite que estabelece a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para a durabilidade, relacionada à fissuração e proteção da armadura, em função da classe de agressividade ambiental. Assim, a abertura máxima de fissuras nos corpos-de-prova prismáticos, que ficaram sob carregamento constante, foi entre 0,3 mm e 0,4 mm (Figura 3). As aberturas de fissuras foram mapeadas ao longo do tempo, até a data de ensaio dos corpos-de-prova.



Figura 3. Medida da abertura de fissura no centro do corpo-de-prova prismático com fissurômetro.

Os corpos-de-prova prismáticos ficaram sob carregamento constante até as datas de ensaios. O esquema apresentado na Figura 4 mostra os corpos-de-prova prismáticos biapoiados em corpos-de-prova cilíndricos de concreto (10x20 cm) com um pórtico central composto de duas chapas de aço e duas barras rosqueadas (de 9,5 mm, 3 porcas, 3 arruelas e duas chapas de aço de 8x300x100 mm) aplicando o carregamento de 250 kgf, ocasionando fissuras no centro da vigas, com aberturas de até de 0,3 mm (dentro dos limites da norma NBR 6118). O carregamento era realizado aplicando-se um torque de 0,5 Kgf.m, com torquímetro, nas barras rosqueadas e, conseqüentemente, a força concentrada era aplicada no corpo-de-prova prismático ocasionando a fissura.



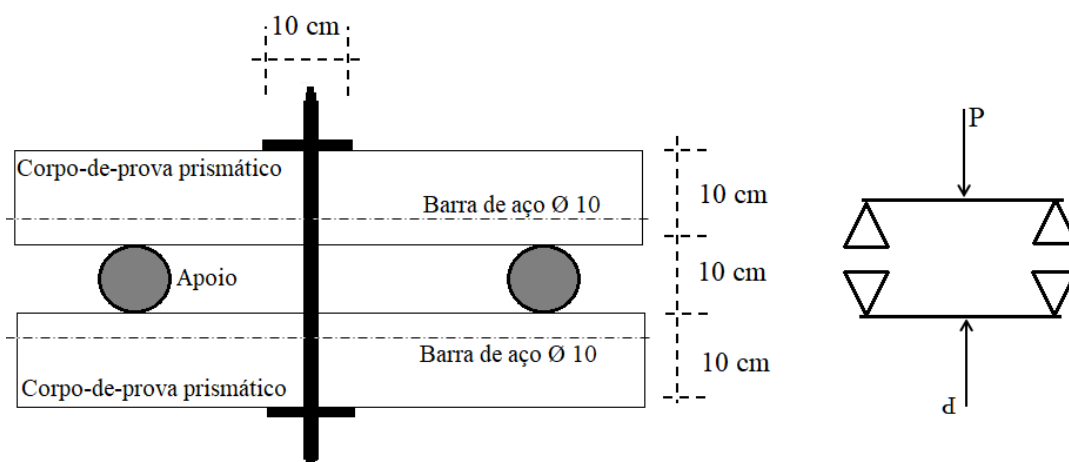


Figura 4. Carregamento central permanente (CCP) nos prismas.

Na Tabela 3 pode-se observar a sequência adotada para as amostras de cada série de moldagem, nas diferentes condições de carregamento e data de ensaios de durabilidade.

Tabela 3. Amostras de cada série de moldagem, nas condições de carregamento.

Amostra	Amostra Sem Carregamento	Amostra sob Carregamento Central de Curta Duração	Amostra sob Carregamento Central Permanente	Data de ensaio
M6um	M6umSC	M6umCCCD	M6umCCP	06 meses
M12um	M12umSC	M12umCCCD	M12umCCP	12 meses
M18um	M18umSC	M18umCCCD	M18umCCP	18 meses
M24um	M24umSC	M24umCCCD	M24umCCP	24 meses

Após a cura úmida de sete dias, os corpos-de-prova passaram por névoa salina até a idade de ensaio. O objetivo da névoa foi simular um ambiente salino, nesse sentido foi borrifada manualmente uma solução de NaCl nos corpos-de-prova prismáticos até seu umedecimento, com uma periodicidade de 3 vezes por semana e três vezes ao dia.

A concentração de sal na água de mar é de 35 gramas de NaCl para cada litro de água. Neste sentido, foi utilizada essa quantidade de 35 g/l de NaCl para a solução simulando a névoa salina.

A aspersão da solução de cloretos ocorreu até as datas de ensaios dos corpos-de-prova prismáticos.

A escolha dessa metodologia foi em função do trabalho de Arya e Darko (1996) que realizaram ensaios de corrosão em vigas de concretos empregando o mesmo procedimento.

Para determinar a profundidade de penetração de cloretos, rompeu-se a seção transversal das amostras, cuja avaliação é realizada pela aspersão de nitrato de prata (solução 0,1N) na superfície do concreto, ocorrendo uma reação fotoquímica, onde os cloretos livres presentes no concreto reagem com os íons de prata da solução de nitrato de prata formando um precipitado branco. Nas regiões onde não há íons cloreto ou cloretos combinados, há o surgimento de uma coloração marrom, o óxido de prata, devido à reação entre os íons de prata e as hidroxilas presentes nos poros do material cimentício (Jucá et.al., 2002; Real et.al., 2015). Através deste método, objetiva-se avaliar se a frente de cloretos alcançou as armaduras. Podem-se observar as etapas de realização do ensaio na Figura 5.

O corte nesses corpos-de-prova prismáticos foi realizado nos terços médios, onde se tem a visão das áreas comprimidas e tracionadas dos corpos-de-prova prismáticos.

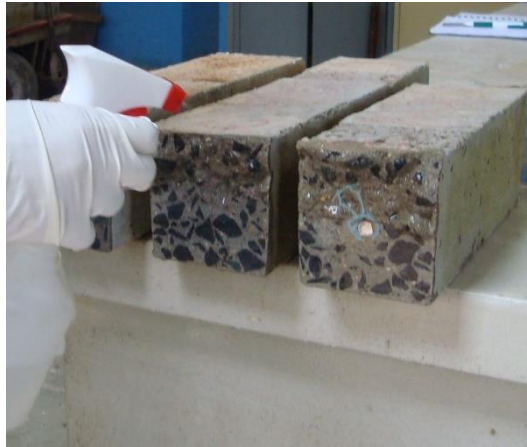


Figura 5. Ensaio de penetração de cloretos com aspersão de nitrato de prata.

Para a análise microestrutural foram retiradas amostras dos corpos-de-prova prismáticos logo após o corte ou ruptura das mesmas e antes da realização dos ensaios de durabilidade, para que as amostras não fossem contaminadas com as soluções de nitrato de prata (Figura 6). Nesse trabalho só foram apresentados os resultados de análise microestrutural aos 6 meses e 24 meses, que foram as primeiras e últimas idades de ensaios, respectivamente.

As amostras foram retiradas das áreas de cobrimento, com profundidade máxima de 1,5 cm. Em corpos-de-prova fissurados foram retiradas amostras na região fissurada (se retirou a amostra exatamente na abertura da fissura ou o mais próximo dela), sempre na região rompida do corpo-de-prova prismático, para serem observadas ao MEV. Devido ao fato do concreto não ser um material condutor, as amostras precisaram ser metalizadas com ouro. Essas amostras foram retiradas com talhadeira de aço e martelo. As observações foram realizadas no Laboratório Nacional de Luz Sincontron (LNLS), em Campinas, Estado de São Paulo.

A medida de energia (EDS) foi adotada nesse trabalho. Neste caso tem-se a vantagem da rapidez na identificação dos elementos químicos presentes (Dedavid et al, 2007).

Área onde era retirada amostra para ensaios de microestrutura

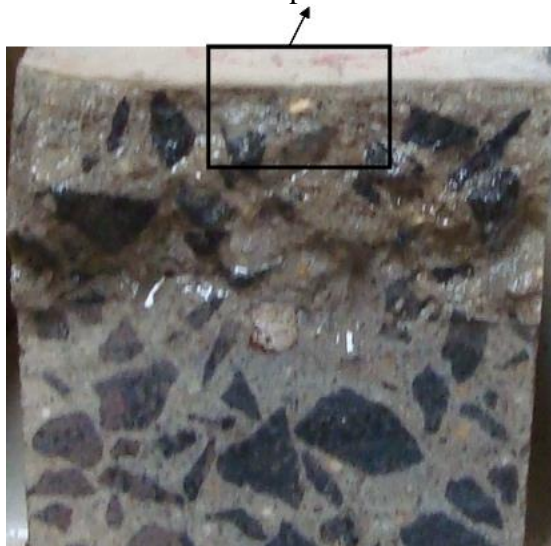


Figura 6. Local onde era retirada a amostra para ensaios de microestrutura.

Os resultados obtidos foram analisados por meio de técnicas de estatística descritiva (cálculo da média, desvio padrão) para caracterizar as variáveis (propriedades do concreto e comportamento quanto à cloretos).

Para determinar diferenças estatisticamente significantes (o nível de significância adotado foi de 5%) entre as médias dos resultados, foram utilizados testes de hipóteses paramétricas -ANOVA e DUCAN (Montgomery, 1991).

Foi utilizado o programa statgraphics para realização dos testes estatísticos. O programa construiu vários testes para comparar as médias de penetração de cloretos entre todas as amostras. O teste F da tabela ANOVA verificou se há diferenças significativas entre as médias dos resultados, em relação aos tipos de cura e de carregamento.

3. RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade do concreto, referente às moldagens realizadas nos corpos-de-prova cilíndricos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de resistência à compressão axial.

Concreto (corpos-de-prova cilíndricos)	Cura dos corpos-de-prova cilíndricos	Idade de ruptura	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
M6um	Imersa até 28 dias	28 dias	66,2	4,3	6,6
M12um			50,2	2,6	5,3
M18um			59,7	4,1	7,0
M24um			56,8	2,6	4,6

Como pode se observar na Tabela 4, as médias dos resultados de resistência à compressão axial ficaram na faixa de 44MPa a 66MPa e os resultados decrescem nesta ordem: M6um, M18um, M24um, M12um. Essa diferença de resultados pode ter sido ocasionada por vários motivos, como temperatura e umidade no momento da moldagem, assim como o transporte, mistura, lançamento, adensamento e cura do concreto utilizado.

Quanto ao coeficiente de variação, ao se utilizar o parâmetro da norma ACI 214R (2002) para verificar como foi a variação atribuída a amostragem, a preparação da amostra, cura e ensaio de laboratório, observa-se que, na classificação apresentada por essa norma, o coeficiente de variação das amostras M12um e M24um são considerados bons ($<5,5$), com exceção das amostras M18um e M6um, que apesar de elevados valores de resistência, são considerados fracos ($>5,5$).

Como verificado na literatura, a resistência à compressão de concretos com a utilização de cimentos com altos teores de escória tende a aumentar com o tempo e o ganho de resistência pode se dar em períodos mais longos. Estudos, como o de Khatib e Hibbert (2005), apontam para um crescimento ainda maior após os 28 dias de idade, nesse sentido pode-se esperar um melhora ainda maior nos resultados de resistência desse trabalho.

Ao longo do período que os corpos-de-prova prismáticos submetidos ao carregamento central permanente ficaram expostos em ambiente, foi realizado o mapeamento das fissuras, como apresentado na Figura 7 (6 meses de idade) e Figura 8 (24 meses de idade).

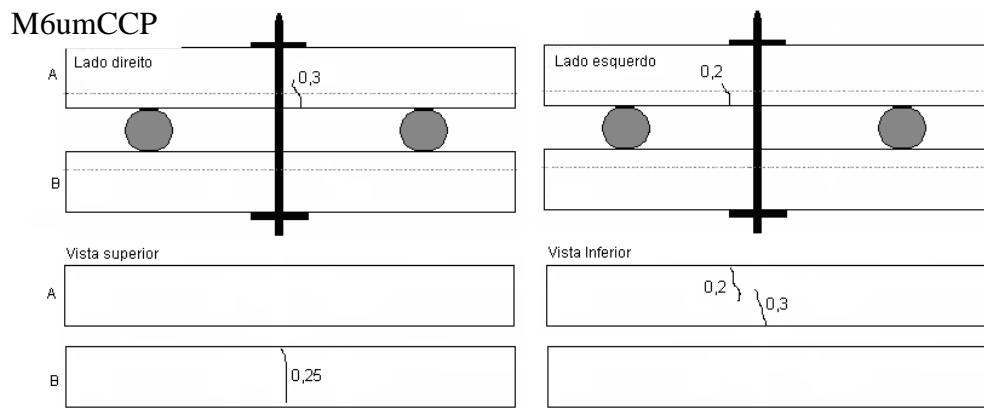


Figura 7. Mapeamento das fissuras nos concretos que ficaram sob carregamento central permanente por 6 meses (M6umCCP).

Os concretos M6umCCP da Figura 7 tiveram aberturas de fissuras de 0,2mm e 0,3mm. Ao longo do período de exposição houve um aumento 0,3 mm para 0,4 mm e 0,25 mm para 0,35 mm. Observou-se nos primeiros seis meses de idade que o pórtico utilizado para a aplicação do carregamento, assim como o monitoramento da abertura de fissura foi eficaz, uma vez que a abertura de fissuras ficou na faixa de 0,3mm e 0,4mm, conforme delineado no programa experimental.

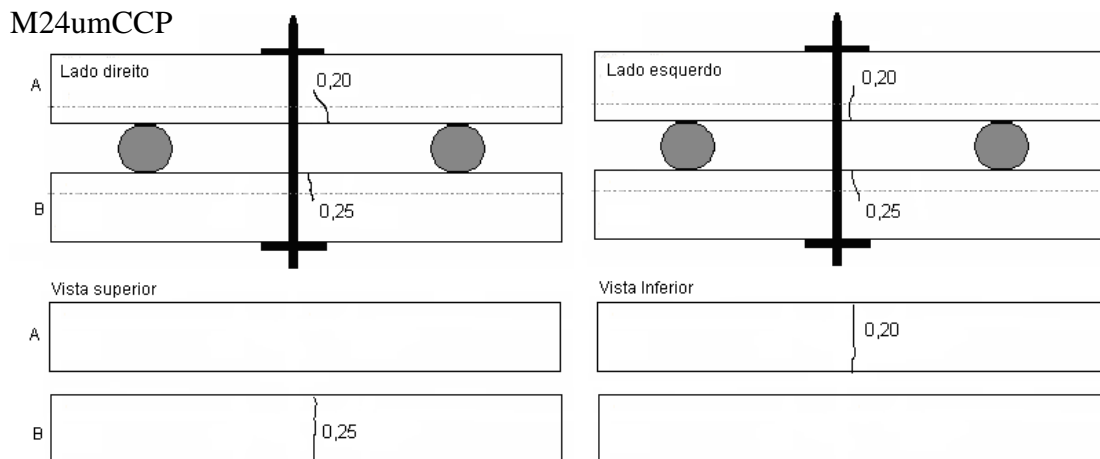


Figura 8. Mapeamento das fissuras nos concretos que ficaram sob carregamento central permanente por 24 meses (M24umCCP).

As fissuras nos corpos-de-prova prismáticos M24umCCP (submetidos à cura úmida) ficaram com aberturas variando entre 0,20 mm a 0,25 m. Aos 24 meses o comportamento das fissuras foi similar às outras idades. As aberturas iniciais eram de 0,2mm a 0,25mm, e chegando a 0,4mm nas idades de ensaio.

Alguns fatores podem ter ocasionado o aumento da abertura de fissuras nos corpos-de-prova ao longo do tempo, entre eles pode-se destacar a carga aplicada permanentemente nesses concretos e o tempo que eles ficaram submetidos a essa carga. Era de se esperar que a abertura de fissuras não fosse permanecer constante pelas próprias propriedades do material (como fluência), mesmo com o suporte da barra de aço. O torque aplicado nos corpos-de-prova também pode ter influenciado nas aberturas de fissuras, pois apesar do valor de torque ter sido definido experimentalmente, cada concreto (nas idades de ensaio e cura) pode apresentar respostas diferentes, como observado no mapeamento, em que algumas amostras tiveram abertura de fissuras maiores.

Em estudos realizados por Vidal et al (2004; 2007) e François et al (2006), que mapearam aberturas das fissuras decorrentes de carregamento, sob ambiente salino por 14 e 17 anos, respectivamente, pode-se observar dois tipos de fissuras, as transversais, induzidas pela ação de carregamento (flexão), e as longitudinais na viga que são referentes à corrosão da armadura, ou seja, fissuras que coincidem com a armadura.

3.1 Profundidade de penetração de cloretos

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de profundidade de penetração de cloretos nos concretos sem carregamento, sob carregamento central de curta duração e sob carregamento central permanente.

Tabela 5. Profundidade de penetração de cloretos sob diferentes condições de carregamento e sem aplicação de carga.

Amostra	Média (mm)	Desvio padrão
M6umSC	0,1	0,1
M12umSC	2,2	0,6
M18umSC	2,3	1,3
M24umSC	2,6	0,7
M6umCCCD	0,2	0,0
M12umCCCD	2,2	0,7
M18umCCCD	1,9	1,1
M24umCCCD	2,5	0,6
M6umCCP	3,3	1,8
M12umCCP	1,7	0,8
M18umCCP	0,3	0,0
M24umCCP	3,0	1,0

Na Tabela 6 são apresentadas as comparações estatísticas entre os três tipos de carregamento utilizados neste trabalho: carregamento permanente pontual - CCP, carregamento de curta duração - CCCD, sem carregamento - SC, nas diferentes idades de ensaio, para os resultados de penetração de cloretos.

Tabela 6. Comparação entre os resultados de penetração de cloretos.

Concreto (corpos-de-prova prismáticos)	Idade de ensaio	Diferença entre resultados de penetração de cloretos
M6umCCP – M6umCCCD	6 meses	Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos CCCD)
M6umCCP – M6umSC		Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos SC)
M6umCCCD - M6umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD > Penetr.cloretos SC)
M12umCCP – M12umCCCD	12 meses	Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos CCCD)
M12umCCP – M12umSC		Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos SC)
M12umCCCD – M12umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD = Penetr.cloretos SC)
M18umCCP – M18umCCCD	18 meses	Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos CCCD)
M18umCCP – M18umSC		Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos SC)
M18umCCCD – M18umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD < Penetr.cloretos SC)
M24umCCP – M24umCCCD	24 meses	Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos CCCD)
M24umCCP – M24umSC		Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos SC)
M24umCCCD – M24umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD < Penetr.cloretos SC)

Aos 6 meses e aos 24 meses a penetração de cloretos foi maior em concretos submetidos ao carregamento central permanente em relação aos concretos sob carregamento central de curta duração e sem carregamento; porém, nesses casos não houve diferença significativa entre os resultados. Aos 12 meses de idade, os concretos com carregamento central permanente tiveram valores de penetração de cloretos menor que os concretos submetidos ao carregamento de curta duração e sem carregamento, e nesse caso também não houve diferenças significativas entre os resultados.

Ao longo dos 24 meses de idade a ação de carregamento, quer seja de curta duração ou permanente, não influenciou significativamente nos resultados de penetração de cloretos em quase todas as idades estudadas.

Ao comparar esses resultados com os obtidos em pesquisas de Vidal et al (2004), Vidal et al (2007) e François et al (2006), observa-se que o fator tempo e o ambiente salino são fundamentais para que o carregamento e, conseqüentemente, a abertura de fissuras, influencie nos resultados de penetração de cloretos. Pesquisas como a de Vidal et al (2007), que deixaram as amostras expostas em ambientes sob névoa salina por um período de mais de 10 anos, obtiveram resultados significativos apenas após 5 anos de exposição. Neste sentido, períodos mais longos devem ser considerados em pesquisas futuras.

Analisando o comportamento de amostras com diferentes porcentagens de escória de alto-forno, submetidas a um carregamento contínuo, An Cheng et al (2005) verificaram que a abertura de fissuras afeta o tempo de início de corrosão de armaduras. Os corpos-de-prova com maior abertura de fissuras foram as que iniciaram primeiro o processo corrosivo; porém, a quantidade de escória adicionada à mistura não influenciou nos resultados, ou seja, com o aumento do teor de escória de alto-forno não teve uma diminuição na velocidade e propagação da corrosão da armadura.

De acordo com o Ayra e Darko (1996) a frequência do aparecimento de fissuras tem influência na intensidade de corrosão que a estrutura está sujeita. Quanto maior a quantidade de fissuras, maior é a intensidade de corrosão no concreto armado. Um fato a ser destacado, neste caso, é a importância do concreto de cobrimento para diminuir esse processo. Da mesma forma, essa espessura pode ser um fator tão importante nesse contexto quanto à própria incidência de fissuras na estrutura. Assim, atenta-se para a importância de estudos sobre o concreto de cobrimento, o que possibilita a obtenção de informações relevantes que contribuem para a produção de concretos duráveis.

Quanto ao período de cura adotado, Thomaz (2005) verificou que o tempo de cura úmida de 7 dias é suficiente para que o concreto adquira as propriedades desejadas, porém, esse prazo depende do

tipo de cimento e da relação água/cimento utilizada. No entanto, quando se utiliza cimentos com adições minerais um tempo maior de cura é necessário, como é o caso de cimento com escória de alto-forno, em que seu processo de hidratação é mais lento que o cimento comum (Çakir; Akoz, 2006; Furnas, 1997; Thomaz, 2005).

Observa-se também em estudos como o de Castro (2003) e Braun (2003) que cimentos com maior teor de adição, como o CP III 32, necessitam de um período maior de cura, em comparação aos outros tipos de cimentos.

3.2 Avaliação da microestrutura

Aos seis meses de idade apenas dois tipos de amostras foram selecionados para ensaios de microestrutura. Essas amostras foram retiradas da região tracionada dos corpos-de-prova prismáticos sem carregamento (SC) e submetidos ao Carregamento Central Permanente (CCP). Ambos ficaram em cura úmida por 7 dias antes de sofrer carregamentos. Na Figura 9 é apresentada uma amostra sem carregamento.

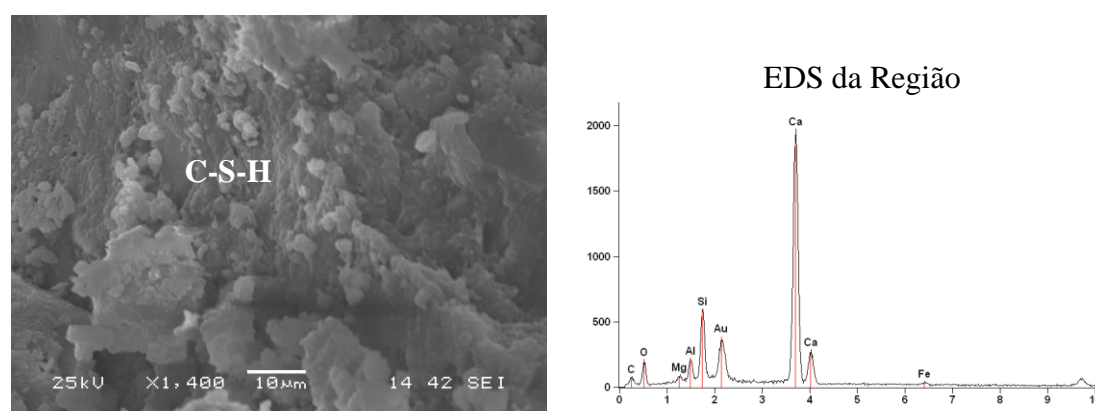


Figura 9. Concreto submetido à cura úmida, sem carregamento, aos seis meses de idade.

Na Figura 9 observa-se uma área com morfologia densa e amorfa (C-S-H Tipo III ou IV), o que é mais comum nesse caso por se tratar de amostras em idades mais avançadas. Cheng et al (2005) observaram nas micrografias de concreto com diferentes teores de escória de alto-forno em elevadas porcentagens, uma estrutura mais densa, com poucas agulhas de etringita e com poros capilares menores que 50 nm, que podem ter sido preenchidos por produtos como o C-S-H. O pico de Au surgiu no EDS da região da Figura 9 pode ser em função da metalização com ouro.

A fase C-S-H ocupa um volume de 50% a 60% de sólidos da pasta de cimento, sendo o principal responsável pelas propriedades da pasta, como a resistência à compressão axial. Sua estrutura depende da temperatura e do espaço livre na mistura para sua hidratação (Baroghel-Bouny, 1994; Irassar, 2004). Essa fase pode ser encontrada nas seguintes morfologias: Tipo I – fibrosas, normalmente em forma de “ouriço”, quando a hidratação está em desenvolvimento (primeiras idades) para fora do grão de C_3S com espaço disponível suficiente; Tipo II – alveolar ou reticulado, também chamado de “favo de mel”, que ocorre em conjunto com o C-S-H Tipo I; Tipo III e IV – proeminente em idades mais avançadas, constitui uma morfologia densa e amorfa, difícil de ser definida e pode constituir uma boa parcela dos produtos hidratados totais. Os produtos característicos em estágios mais avançados da hidratação são o C-S-H tipo III e IV e mais $Ca(OH)_2$ (Taylor, 1997; Ghosh, 2002).

De acordo com Kurdowski (2014) existem 4 formas morfológicas da fase C – S – H: fibroso, malha, partículas isométricas e esféricos conglomerados, pertencentes ao C – S – H interno e identificados como um gel firme sob um microscópio eletrônico

Na Figura 10 observa-se a microestrutura do concreto submetido ao carregamento central permanente em cura úmida por 7 dias, aos seis meses de idade e na Figura 11 é apresentada a

microanálise em três pontos desse mesmo concreto.

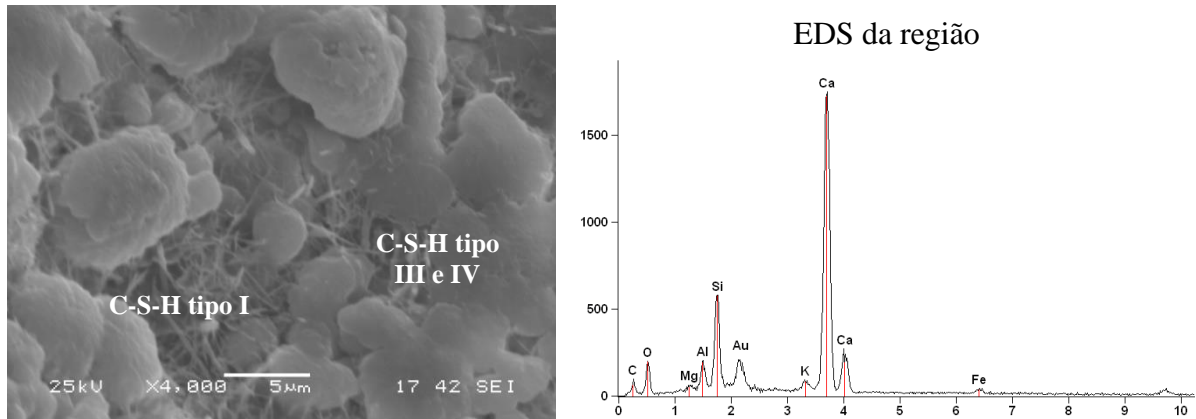


Figura 10. Concreto submetido à cura úmida por 7 dias e carregamento central permanente, aos seis meses de idade.

Na imagem da Figura 10 observam-se algumas agulhas, mas no EDS o elemento enxofre (S) não está presente para que se configurasse uma etringita. Nesse caso podem ser agulhas de C-S-H, com morfologia fibrosa (Tipo I) (Taylor, 1997; Ghosh, 2002). Observam-se também as fases C-S-H tipo III e tipo IV.

Em misturas utilizando cimento de alto-forno, a morfologia fibrilar do C-S-H do cimento Portland sem adições (clínquer Portland), é gradualmente substituída por uma morfologia diferente, que Richardson (1999) denomina de “folha” ou “tipo lâminas”. Esse autor relata que essa mudança de morfologia é responsável pelo melhor desempenho e maior durabilidade das misturas com essa adição. Morfologias essas ainda não observadas na idade de 6 meses de ensaio.

A Figura 11 apresenta três pontos selecionados do concreto submetido à cura úmida por 7 dias e carregamento central permanente. Na composição elementar pelo EDS dos três pontos encontram-se os mesmos elementos Ca, Si, Al e Mg.

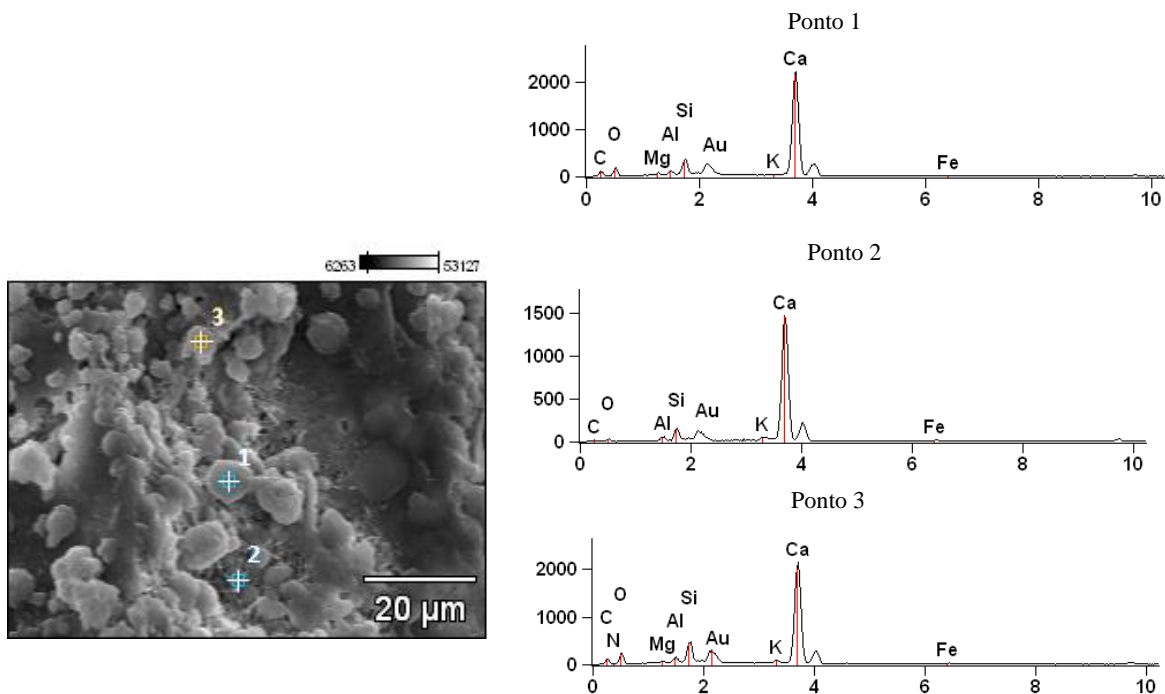


Figura 11 – Microanálise EDS em três pontos do concreto sob carregamento central permanente (CCP).

Na microanálise detectou-se a presença dos elementos Ca, K, Si, Al, Mg, O e C, que são típicos dos produtos de hidratação do cimento.

O C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland e da escória de alto-forno apresentam morfologias semelhantes; porém, o grão de escória apresenta elevadas porcentagens de Mg e Al (Richardson, 1999).

Na Figura 12 é apresentada a micrografia de uma amostra de concreto sem carregamento, submetidas à cura úmida por 7 dias, aos 24 meses de idade.

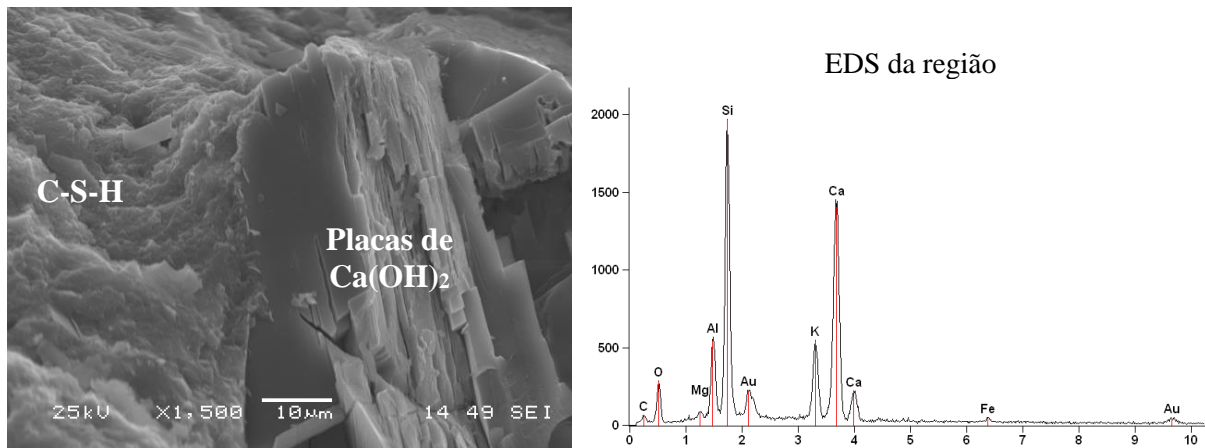


Figura 12. Micrografia e microanálise da amostra de concreto sem carregamento, aos 24 meses de idade.

Na Figura 12 nota-se a presença de possíveis placas de Ca(OH)₂ e C-S-H. Como verificado por Baroghel-Bouny (1994) Mehta e Monteiro (2008), a fase correspondente ao Ca(OH)₂ mantém a alta alcalinidade do sistema, preservando a estabilidade do C-S-H e do concreto de cobertura.

O Ca(OH)₂ ocupa um volume de sólidos de 20% a 25% na pasta de cimento hidratada. Por ter uma composição com estequiometria definida, se formam em grandes cristais com morfologia prismática hexagonal. Essa morfologia pode variar também em função da temperatura de hidratação e das impurezas presentes. Devido a esses fatores, podem-se formar pilhas de grandes placas.

Essa fase mantém a elevada alcalinidade do sistema, preservando a estabilidade do C-S-H e da camada de cobertura da armadura (BAROGHUEL-BOUNY, 1994; CASTRO, 2003).

Na Figura 13 são exibidas as micrografias e EDS do concreto submetido ao carregamento central de curta duração, aos 24 meses de idade.

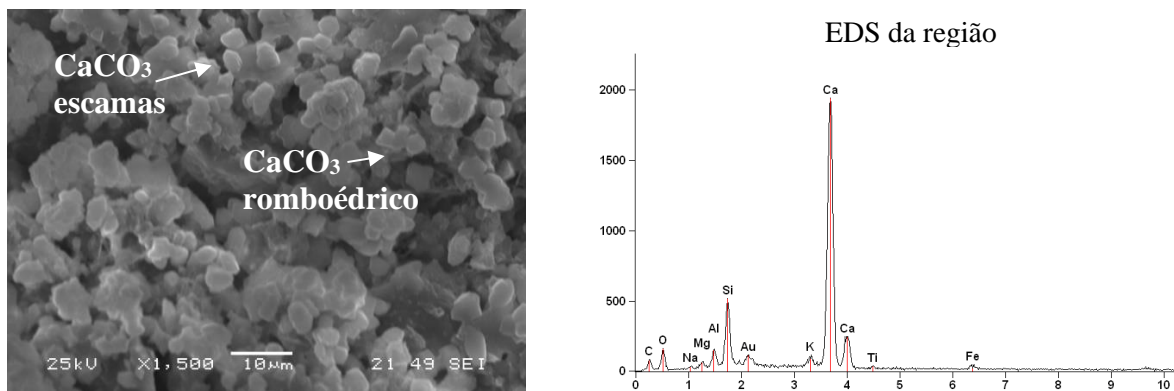


Figura 13 – Micrografia e microanálise da amostra de concreto submetido ao carregamento central de curta duração, aos 24 meses de idade.

Na Figura 13 pode-se observar a formação do carbonato de cálcio na forma de cristais romboédricos e em forma de escamas, sobre um C-S-H poroso e possivelmente carbonatado. Observa-se nos compostos hidratados formados, a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3), com morfologias distintas sobre C-S-H que também já pode estar em processo de modificação pela ação do tempo, e devido a sua porosidade. A fase C-S-H porosa e a formação de CaCO_3 indicada na Figura 13 foi observada também por Sakar et al (2001) em seu estudo, com o CaCO_3 em forma de escamas, porém, em grande quantidade.

Os sais dissolvidos na água do mar são principalmente cloretos e sulfatos. No caso dos íons cloretos (Cl^-), quando em contato com a alumina, o monocloroaluminato se cristaliza em forma de placas hexagonais instáveis. O cloreto entra na rede cristalina dos silicatos hidratados (C-S-H) e transforma as fibras em redes reticuladas, tornando essa fase mais porosa. Regourd et al (1980) observaram também a presença de CaCO_3 em micrografias de amostras de concretos (compostos hidratados do cimento Portland) expostos à névoa salina.

Na Figura 14 é apresentada a micrografia e microanálise do concreto submetido ao carregamento central permanente (CCP), aos 24 meses de idade.

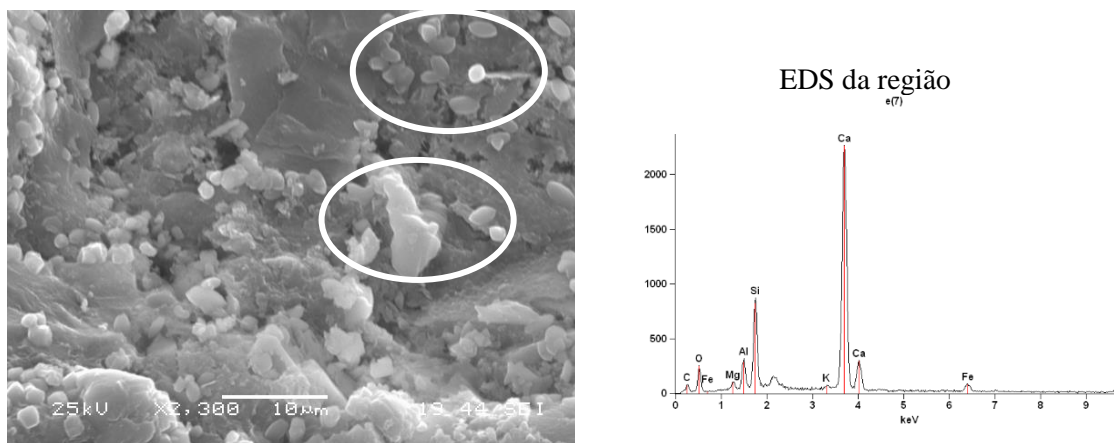


Figura 14. Micrografias e microanálises dos concretos com carregamento central permanente.

Na amostra da Figura 141 observa-se área com uma microestrutura mais densa, com diferentes morfologias de CaCO_3 ; porém, alguns produtos que chamaram atenção, e que estão em destaque nessa micrografia. Por sua morfologia podem configurar matéria orgânica, sendo provavelmente microorganismos (Ribas Silva, 1996). Porém, para se confirmar essa hipótese seria necessária uma análise microbiológica, que não foi realizada por não ser objeto desse estudo. Nesse caso, a fissura induzida por carregamento poderia ter propiciado a entrada desses microorganismos, uma vez que não foram observados nos concretos SC e CCCD.

Ao comparar as micrografias, quanto aos carregamentos CCCD e CCP e sem carregamento (SC), observa-se que a amostra com maior compacidade e menor quantidade de poros é a referência (SC). Quanto aos compostos formados, nas micrografias do concreto CCCD pode ser vista a fase C-S-H carbonatada. Quando submetido ao carregamento central permanente, a fase de C-S-H está densa com a formação de microorganismos, e a porosidade nesse caso não é elevada, provavelmente pela cura úmida aos 7 dias. E no concreto de referência (SC) tem-se a formação do Ca(OH)_2 , assim como a fase do C-S-H densa e homogênea. Observa-se assim a influência das fissuras na durabilidade do material, uma vez que no concreto com as placas de Ca(OH)_2 tem-se uma maior alcalinidade do sistema e a preservação da fase C-S-H, conseqüentemente, da camada de cobrimento (Baroghel-Bouny, 1994; Mehta, Monteiro; 2008).

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos de penetração de cloretos observou-se que a abertura de fissuras não influenciou na entrada de íons cloretos na estrutura, não havendo diferenças significativas entre os tipos de carregamento e o concreto de referência (sem carregamento).

Estudos realizados na Europa sobre o tema utilizam períodos maiores de exposição ao ambiente externo para obtenção de resultados mais expressivos quanto ao comportamento da fissura na penetração de íons cloretos no concreto. Nesse sentido vê-se que para os concretos estudados, um período maior seria necessário para que houvesse resultados mais significativos entre os tipos de carregamento e sem carregamento. Alguns fatores também podem ter contribuído para esse resultado, ressaltando-se nesse caso a utilização de cimento com adição de escória de alto-forno, que é mais resistente ao ataque de cloretos, em comparação ao CO₂. A névoa salina utilizada parece também não ter contribuído o suficiente para que se pudessem ter diferenças entre os tipos de carregamento e sem carregamento.

Ao comparar as tolerâncias de abertura de fissura da norma brasileira com as normas internacionais verifica-se que as aberturas permitidas para a norma brasileira são maiores. Apesar das condições climáticas na Europa, por exemplo, ser bem diferentes que o Brasil onde se tem variações de temperatura que oscilam de -5°C a 30°C como é o caso da França e no Brasil tem-se variações que giram em torno de 20°C a 35°C, porém, vê-se que o controle tecnológico de qualidade dos materiais e execução no Brasil tende a ser menos rigoroso, com isso as aberturas de fissuras podem ser um agravante nesse contexto. Por outro lado, observa-se nesse estudo que nas situações climáticas brasileiras, até a idade de dois anos não houve diferenças significativas entre os resultados de amostras sob a condição de carregamento determinada nesse estudo a de referência ou seja, sem carregamento.

Até os 12 meses observou-se nas micrografias e microanálises a formação de produtos de hidratação do cimento, sendo encontrado principalmente as fases C-S-H, além de cristais de Ca(OH)₂, agulhas de etringita e de C-S-H e grãos de escória com diferentes dimensões. Os produtos de deterioração (CaCO₃ e C-S-H carbonatado) foram encontrados a partir dos 18 meses, nas situações de carregamento e cura. Porém, apenas aos 24 meses fica mais evidente que nos concretos submetidos aos tipos de carregamento (CCP e CCCD) foi observada a presença de CaCO₃ e C-S-H carbonatado e na amostra sem carregamento foram encontradas apenas fases de C-S-H e Ca(OH)₂. No entanto, no concreto com abertura de fissuras (CCP) foram encontrados possíveis microorganismos, que pode ter entrado pela fissura.

Do ponto de vista microestrutural observou-se que aos 24 meses o carregamento influenciou nos resultados das amostras estudadas, uma vez que nos concretos com abertura de fissuras foram visualizados na microscopia a presença de microorganismos em amostras submetidas a carregamento permanente. Esses compostos só foram encontrados nos concretos com abertura de fissuras (em carregamento central permanente). Nesse sentido, vê-se que a fissura pode ter sido um caminho para entrada desses microorganismos, as quais podem ter consequências na durabilidade, como verificado na literatura.

Assim, observa-se que a fissura (quando constantemente aberta) pode influenciar na microestrutura do concreto ao longo do tempo, em função do caminho preferencial para entrada de agentes agressivos e microorganismos. Fato esse que não foi observado nos concretos com carregamento de curta duração e sem carregamento.

5. REFERÊNCIAS

ACI – American Concrete Institute (2016). *Standard practice for curing concrete. ACI 308-2016*. ACI Committee 308, 2016.

- Alexander, M. G., Mackechnie, J. R., Ballim, Y. (2001), *Use of durability indexes do achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures*. Materials science of concrete VI. Ed. By Sidney Mindess, Jan Skalny. Published by American Ceramic Society.
- Andrade, T. (2005), *Tópicos de durabilidade do concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 753-792.
- Arya, C., Ofori-Darko, F. K. (1996). *Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete*. Cement and Concrete Research, v.26, No. 3, p. 345-353, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85022-8)
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2020). *NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Baroghel-Bouny, V. (1994), *Caractérisation des patês de ciment et des bétons – Méthodes, analyses, interpretations*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, IST – Section des publications.
- Braun, V. (2003), “*Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos*”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás – UFG.
- Çakir, Ö., Aköz, F. (2006), *Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.013>
- Cascudo, O. (2005), “*Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura*”. In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 985-1016.
- Cascudo, O. (1997), *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG.
- Castro, A. (2003), *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação*. Dissertação de mestrado, Universidade de Goiás.
- Cheng, A., Huang, R., Wu, J., Chen, C. (2005), Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. *Materials Chemistry and Physics*, v. 93, p. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.03.043>
- Crauss, C. (2010), *Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria-RS.
- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., Machado, G. (2007), *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras - materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60 p.
- Figueiredo, C. R., Nepomuceno, A. A. (2004), *Influência da absorção na carbonatação de estruturas de concreto in loco*. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis. Anais... São Paulo: IBRACON, v. 1.
- Figueiredo, E. P. (2005), “*Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*”. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, Volume 2. p. 829-856.
- Fortes, L. C., Andrade, J. C. (1995), *Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação*. ASTEF - Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo de Frontin. URL: http://www.electus.com.br/usuarios/lyttelto/InfluAgClorCarb/Influ_index.htm
- François, R., Castel, A., Vidal, T., Vu, N. A. (2006), *Long term corrosion behavior of reinforced concrete structures in chloride environment*. *J. Phys. IV France* 136, 285–293. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006136029>

- Furnas, E. L. C. (1997), *Concreto massa estrutural projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo: Pini.
- Ghali, A., Favre, R. (1994), “*Concrete Structures: Stresses and Deformations*”. E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, second edition.
- Ghosh, S. N. (2002), “*Advances in cement technology: Chemistry, Manufacture and Testing*”. Second Edition, published by Tech Books International, New Delhi, India.
- Hearn, N., Figg, J. (2001), *Transport mechanisms and damage: Current issues in permeation characteristics of concrete*. Materials science of concrete. Ed. By Jan Skalny, American Ceramic Society. v. VI, p.327-376.
- Helene, P. R. L. (1997), *Vida útil das estruturas de concreto armado*. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. VI Congresso de Controle de Qualidade – COMPAT 97. Anais... Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil – UFRS, p. 1-30.
- Helene, P., Diniz, J. Z. (2001), *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. 43º Congresso Brasileiro de Concreto. Curso de durabilidade. 18 a 23 de agosto de 2001, Foz do Iguaçu – PR.
- Helmuth, R., Stark, D. (1992), *Alkali-silica reactivity mechanisms*. Materials Science of Concrete III. Ed. By Jan Skalny. American Ceramic Society, USA.
- Illston, J. M. (1994), *Construction Materials – Their nature and behaviour*. 2ª ed. London – UK: E & FN SPON, 518p.
- Irassar, E. (2004), *Hormigón: Naturaleza y Propiedades. Hormigones Especiales – XV. Reunión Técnica Ing. Marcelo Wainsztein, Asociación Argentina de Tecnología del hormigón*. Santa Fe, 21 al 24 de octubre de 2004.
- Ismail, M., Gagné, R., François, R., Toumi, A. (2006), *Measurement and modeling of gas transfer in cracked mortars*. Materials and Structures, v. 39, p. 43–52, <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9025-4>
- Jucá, T. R. P. (2002), “*Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*”. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil.
- Khatib, J. M., Hibbert, J. J. (2005), *Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin*. Construction and Building Materials, v. 19 460–472, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017>
- Kim, M. Y., Yang, E. I., Yi, S. T. (2013), *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 239-245, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.084>
- Konin, A., Franfois, R., Arliguie, G. (1998), *Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 31, p. 27-35, <https://doi.org/10.1007/BF02486411>
- Lawrence, C. D. (2006), *Physiochemical and Mechanical Properties of Portland Cements. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*. Ed. By Peter C Hewlett. Elsevier Butterworth Heinemann, USA.
- Martins, A. R. (2001), *Efeito da cura térmica e de cimento com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento*. Dissertação mestrado, Universidade Estadual de Campinas-SP.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. 3ª Edição, São Paulo: IBRACON.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 751 p.
- Midness, S., Young, J. F. (1981), *Concrete*. Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New Jersey – USA.
- Montgomery, D. C. (1991), *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons.

- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015), *Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte*. Revista ALCONPAT, 5(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Ribas Silva, M. (1996), *Climates and biodeterioration of concrete. Durability of building materials & components 7. Volume one – Prediction, degradation & materials*. Edited by Christer Sjostrom. Published by E & FN Spon. Chapman & Hall, London, UK.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Sarkar, S. L., Aimin, X., Jana, D. (2001), *Scanning Electron Microscopy, X-Ray microanalysis of concrete. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, techniques and applications*. Construction and Building Materials, USA, Ed. By V. S. RAMACHANDRAN, J. J BEAUDOIN.
- Taylor, H. F. W. (1997), “*Cement Chemistry*”. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174.
- 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), p. 1551–1561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Regourd, M. (1980), *Structure and behavior of slag Portland cement hidrates*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7Th. Proceedings. Paris.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Romano, F. S. (2009), *Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS.
- Silvestro, L., Romano, F. S., Dal Molin, D. C. C. (2021), *Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 101-118, <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100496>
- Song, H., Lee, C., Ann, K. Y. (2008), *Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments*. Cement & Concrete Composites. v. 30, p. 113–121, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Taylor, H. F. W. (1997), *Cement Chemistry*. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Thomaz, E. (2005), *Execução, controle e desempenho das estruturas de concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v, volume 1. p. 527-582.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00246-1)
- 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, v. 37, p. 1551–1561, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Kurdowski, W. (2014), *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, Dordrecht, <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Hai-Long, W., Jian-Guo, D., Xiao-Yan, S., Xiao-Long Z. (2016), *Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.002>

Uso de quitosana como revestimento orgânico para prevenir/inibir a corrosão de armadura do concreto armado

I. Rivera-Ortiz¹ , Y. Díaz-Blanco^{1*} , C. Menchaca-Campos¹ , J. Uruchurtu-Chavarín¹ 

* Autor de Contato: yohandry.diaz@alumnos.uaem.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.519>

Recepção: 23/10/2020 | Aceitação: 23/02/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

Este trabalho analisa o desempenho do concreto armado (RC) frente à corrosão, aplicando um revestimento de quitosana na armadura. Os corpos de prova foram preparados com diferentes quantidades de quitosana utilizando solventes de vinagre de maçã, ácido acético e vinagre de álcool de cana-de-açúcar, e submetidos a ensaios eletroquímicos de curvas de polarização (PC), potencial de meia-célula (HCP), ruído eletroquímico (EN) e resistência a polarização linear (LPR). A quantidade de quitosana e camadas ideais (espessura) foram determinadas visando uma melhoria nas propriedades de proteção. Baixas taxas de corrosão foram obtidas em concretos expostos a cloretos por 200 dias. A preservação do revestimento sobre o aço no concreto destes corpos de prova torna-se interessante para estudos futuros.

Palavras-chave: corrosão; inibidor; vinagre de maçã; concreto; quitosana.

Citar como: Rivera-Ortiz, I., Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Uruchurtu-Chavarín, J. (2021), “Uso de quitosana como revestimento orgânico para prevenir/inibir a corrosão de armadura do concreto armado”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 38 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.519>

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a ideia original da pesquisa foi de I. Rivera Ortiz (20%), C. Menchaca-Campos (40%) e J. Uruchurtu-Chavarín (40%). A administração do projeto esteve a cargo de C. Menchaca-Campos (60%) e J. Uruchurtu-Chavarín (40%). A metodologia e a experimentação ficaram a cargo de I. Rivera Ortiz (40%), Y. Díaz-Blanco (40%), C. Menchaca-Campos (10%) e J. Uruchurtu-Chavarín (10%). O processamento dos dados foi realizado por I. Rivera Ortiz (60%) e Y. Díaz-Blanco (40%). A redação, revisão e edição ficaram a cargo de Y. Díaz-Blanco (80%) e J. Uruchurtu-Chavarín (20%). A análise e discussão dos resultados estiveram a cargo de I. Rivera Ortiz (60%), C. Menchaca-Campos (20%) e J. Uruchurtu-Chavarín (20%).

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Use of chitosan as an organic coating to prevent / inhibit the corrosion of reinforced concrete

ABSTRACT

This work analyzes the performance of reinforced concrete (RC) against corrosion by applying a chitosan coating to the rebar. Specimens with different amounts of chitosan using solvents of apple vinegar, acetic acid and sugarcane alcohol vinegar were prepared and subjected to electrochemical polarization curves (PC), half-cell potential (HCP), electrochemical noise (EN) and linear polarization resistance (LPR) tests. The amount of chitosan and optimal layers (thickness) with an improvement in the protective properties was determined and low corrosion rates were obtained in the concrete exposed to chlorides for 200 days. The preservation of the coating on the steel in concrete turns out to be interesting for future studies.

Keywords: corrosion; inhibitor; apple vinegar; concrete; chitosan.

Utilización del quitosano como recubrimiento orgánico para prevenir/inhibir la corrosión del concreto reforzado

RESUMEN (letras de 13 pts. Times New Roman, negritas)

Este trabajo analiza el desempeño del concreto reforzado (RC) frente a la corrosión, aplicando un recubrimiento de quitosano a la varilla. Los especímenes se prepararon con diferentes cantidades de quitosano usando disolventes de vinagre de manzana, ácido acético, y vinagre de alcohol de caña de azúcar, y se sometieron a pruebas electroquímicas de curvas de polarización (PC), potencial de media celda (HCP), ruido electroquímico (EN) y resistencia a la polarización lineal (LPR). Se determinó la cantidad de quitosano y capas (espesor) óptimas con una mejora en las propiedades protectoras y se obtuvieron velocidades de corrosión bajas del concreto expuesto a cloruros durante 200 días. La conservación del recubrimiento sobre el acero en el concreto resulta ser interesante para estudios futuros.

Palabras clave: corrosión; inhibidor; vinagre de manzana; concreto; quitosano.

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 em estruturas de concreto armado (RCS) se reflete na perda de resistência à compressão do material, bem como nas tensões internas geradas pelos produtos de corrosão do aço, que não podem ser suportadas pela deformação plástica limitada do concreto que levam à fissuração (Taylor, 1990). O concreto à base de cimento Portland é atualmente o material manufaturado mais utilizado pelo homem e cujo futuro, de acordo com as tendências mundiais, tende a ser mais significativo e importante (O Reilly, 2007).

Em relação à corrosão na armadura do concreto, deve-se observar que a qualidade dos materiais, proporção nos agregados, práticas construtivas, espessura do revestimento, relação água-cimento (a/c) podem melhorar ou diminuir o grau de proteção do concreto contra agentes externos. Ressalta-se que a mistura de concreto confeccionada com cimento Portland confere aos materiais embutidos uma proteção adequada contra a corrosão (Hostalet Alba, 1994). Isso porque funciona como uma barreira que protege a armadura dos agentes agressivos externos e, devido à sua alcalinidade, o aço desenvolve uma camada passiva na superfície que a mantém protegida por tempo indeterminado. No entanto, a corrosão das armaduras de aço é a principal causa de danos e falhas prematuras de estruturas de concreto armado.

Em ambientes marinhos, a principal causa de corrosão nas armaduras de concreto (CRS) foi identificada como o ataque de íons cloreto, que induzem a despassivação do aço. Esses íons, quando misturados com água e oxigênio, dão origem a ataques específicos que podem reduzir a seção efetiva da armadura. Neste ponto, devem ser consideradas não apenas as perdas econômicas que ocorrem devido à corrosão, mas também as perdas humanas que ocorrem devido a colapsos ou acidentes causados por falhas de estruturas em colapso, não sendo capazes de suportar o esforço para o qual foram projetadas (Pech-Canul e Castro, 2002). Da mesma forma, a modificação do concreto e do elemento metálico, por meio do uso de materiais e revestimentos poliméricos, tem sido estudada durante as últimas quatro décadas com resultados mistos (Dodson, 1990).

Por outro lado, a utilização de resíduos para a obtenção de produtos de alto valor agregado constitui um caminho para uma economia sustentável. Atualmente na área da ciência dos biomateriais, os cientistas têm se concentrado no estudo de diversos materiais devido ao seu alto potencial e aplicabilidade como: quitina e quitosana, entre outros (Anandhavelu et. Al., 2017; Pakdel e Peighambardoust, 2018).

A quitina é um biopolímero que está presente no exoesqueleto de artrópodes, tais como: lagostas, caranguejos e camarões; insetos e também é encontrada na parede celular das diatomáceas, e outras algas e fungos onde atua como um reforço das células. Este material por si só não é tóxico e é relativamente fácil de degradar, portanto sua aplicação é ambientalmente aceitável (Dima e Zaritzky, 2019). É o segundo biopolímero mais importante do nosso planeta (depois da celulose) e é um polissacarídeo que contém grupos funcionais de acetamida. A quitina comercial é obtida principalmente das conchas de crustáceos (Gacén e Gacén, 1996).

Quando esses grupos são removidos da quitina por meio do processo denominado desacetilação, obtém-se a quitosana, que ainda é um biopolímero com distribuição regular de grupos amino (Hernández Cocoltzi et. Al., 2009). A quitosana possui excelentes propriedades como antifúngica, antiviral, antimicrobiana, biocompatível, biodegradável, não tóxica, emulsificante, absorvente de poluentes, entre outras, sendo altamente aplicável em diversos campos (Dima e Zaritzky, 2019). Devido às suas interessantes propriedades físico-químicas, estruturais e funcionais, torna-se um candidato adequado no desenvolvimento de revestimentos anticorrosivos, principalmente devido ao seu caráter formador de filme, sua capacidade de aderir a superfícies metálicas e a possibilidade de formação de complexos (Anandhavelu et al., 2017).

Quitosana sendo um produto parcialmente desacetilado de quitina, é um copolímero linear de β -(1-4)-2-amido-2-desoxi-D-glucana (glucosamina) e β -(1-4)-2-acetamido - desoxi-D-glucano (N-

acetilglucosamina) (Carneiro et. al., 2013; Carneiro et. al., 2015; Bezerra, 2016) e apresenta uma configuração helicoidal tridimensional estabilizada por ligações de hidrogênio entre os monômeros que o formam (Sousa Andrade et. Al., 2003).

Devido às suas características funcionais (Knorr, 1991; Ashassi-Sorkhabi e Kazempour, 2020), a quitina e a quitosana são excelentes candidatos como agregados em misturas de concreto e como revestimento de aço da armadura (RS) para evitar ou diminuir a corrosão e os produtos resultantes em RC (Dodson e Hayden, 1989). Resíduos de camarão, geralmente responsáveis por um problema ambiental, podem se tornar uma solução para problemas de corrosão em estruturas (Martínez-Barrera et. Al., 2005; Pacheco, 2010; Castelló et. Al., 2019). Buscou-se desenvolver um método pelo qual, ao melhorar as propriedades mecânicas do concreto, seja possível controlar e reduzir a corrosão RC, em comparação com o concreto hidráulico convencional (Martínez-Barrera et. Al., 2005).

Neste trabalho, a eficácia e o comportamento do agregado de exoesqueleto de camarão, quitina e quitosana como agregados dentro da matriz foram estudados para avaliar a resistência à compressão de cubos de argamassa de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Os revestimentos de quitosana em eletrodos encapsulados foram avaliados para determinar a quantidade ideal e o número de camadas com o melhor desempenho em hidróxido de cálcio com solução de cloreto de cálcio. O melhor revestimento foi aplicado nas barras de aço embutidas em amostras de concreto de 10 cm x 7 cm x 10 cm. O exposto acima, a fim de analisar o comportamento eletroquímico do CR ao longo do tempo, exposto a uma solução de cloreto de sódio a 3%.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais.

A qualidade do concreto é altamente dependente da qualidade da pasta do concreto. Os materiais que foram utilizados para a preparação das misturas neste trabalho de pesquisa estão de acordo com a norma (ASTM C33, 2003). Foram utilizados cimento Portland comum CPO 20R (Cemex), brita de areia (passagem de malha # 4) e cascalho da região com tamanho máximo de 3/4". A relação água / cimento foi de 0,5, tanto para as amostras de argamassa quanto para as amostras de concreto, o aço formado por barras corrugadas tinha diâmetro de 3/8", grau 42 de resistência de 4.200 kg/cm².

No caso dos agregados, exoesqueletos foram coletados dos resíduos da indústria do camarão, que representam milhões de toneladas de lixo em todo o mundo (Hernández Cocoltzi et. Al., 2009). A quitina e a quitosana foram adquiridas na Universidad Autónoma Metropolitana e também a partir de resíduos de camarão seco.

As malhas utilizadas na classificação dos materiais são do GRUPO FIICSA. Para o estudo, todo o exoesqueleto de camarão retido na malha #4, o exoesqueleto moído retido na malha #30, o exoesqueleto de fibra retido na malha #8, a quitina retida na malha #8 e a quitina de grau reativo retido na malha #100 e a quitosana retida na malha #30.

2.2. Processamento e síntese dos diferentes agregados.

2.2.1. Exoesqueleto de camarão como agregado sólido.

Uma vez obtido o exoesqueleto de camarão para uso como agregado, foi previamente lavado com água destilada e desidratado em forno elétrico a 200°C por 30 min. A partir do agregado seco e com o uso de moinho, foi obtido o exoesqueleto moído com os tamanhos de partícula desejados. Da mesma forma, o agregado foi cortado em fibras para analisar se a geometria teve algum efeito nas propriedades mecânicas do material compósito. Desta forma, três geometrias diferentes foram processadas, exoesqueleto inteiro, triturado e fibras. Quitina, quitina grau reagente e quitosana foram usados na mesma apresentação em que foram adquiridos.

2.2.2. Síntese dos agregados para recobrimento.

Vários procedimentos foram realizados para a extração dos diferentes revestimentos do material de base agregado (exoesqueleto de camarão, quitina e quitosana). O exoesqueleto de camarão foi testado quanto a dissolução em meios de ácidos, cetonas e outros produtos com os quais não obteve sucesso, para os quais o uso do exoesqueleto foi descartado para usá-lo como inibidor ou revestimento. No caso da quitina e da quitosana, tomou-se como referência a proposta relatada na literatura (Shrinivas Rao et. Al., 2007). A porcentagem de quitina solúvel foi calculada dissolvendo 0,1 g de quitina em 25 ml de uma solução de N, N-dimetilacetamida (DMAc) com 5% de cloreto de lítio (Shrinivas Rao et. Al., 2007) por 72 horas, com agitação constante em temperatura ambiente e aplicação de calor esporadicamente com uma pistola de ar quente. No caso da quitina, o uso de cloreto de lítio torna esse revestimento impróprio para uso, já que uma parte fundamental desse trabalho é gerar produtos amigáveis ao meio ambiente, então a ideia foi descartada.

A porcentagem de quitosana solúvel foi calculada dissolvendo 0,1 g em 25 ml de uma solução de ácido acético glacial AE2E3 (0,1 M Sigma-Aldrich) por 72 h, com agitação constante à temperatura ambiente, em seguida foi filtrada com papel de filtro de celulose (0,45 microns) e a quantidade de quitosana solúvel foi determinada pela diferença de peso (Shrinivas Rao et. al., 2007). Para a quitosana, buscou-se outra alternativa de solvente mais ecologicamente correta. Nesse sentido, o ácido acético de grau reativo foi substituído pelo vinagre de maçã, isso com o objetivo de utilizar um solvente menos agressivo. Por fim, optou-se por utilizar quitosana dissolvida em ácido acético e vinagre de maçã, variando a quantidade de quitosana de 0,1g em 1g para demonstrar se a quantidade de agregado e o tipo de solvente contribuíam para maior resistência à corrosão.

2.3. Dosagem e procedimento de moldagem dos corpos de prova.

2.3.1. Corpos de prova para ensaios mecânicos.

Os corpos de prova foram moldados de acordo com as normas (ASTM C109, 2016; ASTM C192, 2014) com medidas de 5 cm x 5 cm x 5 cm. A Tabela 1 mostra a dosagem e o peso de todos os materiais nos baldes de argamassa para cada amostra projetada.

Para a confecção dos corpos de prova algumas considerações foram levadas em conta. A fôrma foi elaborada em madeira engraxada internamente para garantir a remoção adequada dos cubos e evitar a fratura ou quebra da argamassa endurecida durante o processo. A mistura cimento-areia foi preparada, primeiro misturando os materiais sólidos e adicionando 1 g de cada um dos agregados de exoesqueleto inteiro, exoesqueleto moído, exoesqueleto de fibra, quitina, quitina de grau reativo e quitosana separadamente;

Por último, a água foi adicionada à mistura. A pasta foi agitada por alguns minutos até que uma mistura homogênea fosse obtida e a argamassa fosse despejada em cada molde. Todo o processo, desde a preparação até o lançamento da mistura de argamassa, não deve ultrapassar 15 minutos. As amostras foram identificadas e a superfície de cada molde protegida. Os cubos foram retirados do molde após 24 h, momento em que os corpos de prova foram curados por 28 dias até a obtenção de sua resistência máxima.

Tabela 1. Dosagem de materiais para cada amostra de argamassa.

Materiais	Quantidade de materiais por amostra							Materiais para 1 m ³
	Amostra controle 1	Amostras com agregados						
		2	3	4	5	6	7	
Cimento CPO 20R (kg)	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	288
Areia (kg)	0.228	0.228	0.228	0.228	0.228	0.228	0.228	1824
Água (l)	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	144
Exoesqueleto fibra (kg)	-	0.001	-	-	-	-	-	8
Exoesqueleto inteiro (kg)	-	-	0.001	-	-	-	-	8
Exoesqueleto moído (kg)	-	-	-	0.001	-	-	-	8
Quitina (kg)	-	-	-	-	0.001	-	-	8
Quitosano (kg)	-	-	-	-	-	0.001	-	8
Quitina grau reativo (kg)	-	-	-	-	-	-	0.001	8

2.3.2. *Corpos de prova metálicos para ensaios eletroquímicos.*

Amostras cilíndricas foram confeccionadas para ensaios eletroquímicos em solução de hidróxido de cálcio (pH13) com cloreto de cálcio a 3%. Isso com o objetivo de simular as condições e o comportamento do aço com revestimento de quitosana envuelto pelo concreto exposto a íons cloreto. Para a confecção dos corpos de prova foram cortadas as barras de aço de 3/8", às quais foi soldado um cabo de cobre em uma das extremidades para garantir a continuidade elétrica do aço e poder fazer as leituras de potencial e corrente.

Posteriormente, foram encapsuladas com resina e realizado um tratamento superficial na face do aço com lixa 600 para garantir a aderência do revestimento. Terminada a superfície do eletrodo, este foi lavado com água destilada, depois com acetona e finalmente seco ao ar (Gholamhosseinzadeh et. Al., 2019). Esses corpos de prova metálicos foram avaliados eletroquimicamente (com e sem revestimento) expostos à solução simulada.

A partir dos revestimentos obtidos a partir da quitosana nos solventes ácido acético de grau reativo, vinagre de maçã e vinagre branco de álcool de cana-de-açúcar, os tubos de ensaio foram imersos (dip coating) nas soluções previamente sintetizadas com quitosana. Uma vez que o revestimento é formado, os tubos de ensaio são secos por 15 min. Este processo foi repetido mais duas a quatro vezes até que a superfície exposta fosse coberta com várias camadas. Com esse processo, foram obtidos revestimentos entre 2 e 3 µm de espessura. A superfície de aço encapsulado revestido é mostrada na Figura 1.



Figura 1. Tonalidade que se observa na superfície da amostra com revestimento.

2.3.3. *Corpos de prova de concreto para ensaios eletroquímicos.*

Os corpos de prova de concreto foram fabricados de acordo com as normas (ASTM C31, 2012; ASTM C192, 2014) levando em consideração uma resistência de projeto de 200 kg / cm² e uma relação água / cimento de 0,5. A Tabela 2 mostra a dosagem e o peso dos materiais para cada amostra de concreto. As dimensões das amostras de concreto foram de 10 cm x 7 cm x 10 cm, conforme representado na Figura 2.

Tabela 2. Dosagem de materiais para cada amostra de concreto armado.

Materiais	Quantidade de materiais por amostra			Materiais para 1 m ³
	Amostra de controle	Amostras com revestimento aplicado sobre as armaduras		
		2 (0.5gVM)	3 (0.5gAA)	
Cimento CPO 20R (kg)	0.196	0.196	0.196	280
Areia(kg)	0.577	0.577	0.577	824
Cascalho (kg)	0.662	0.662	0.662	946
Água (l)	0.098	0.098	0.098	140

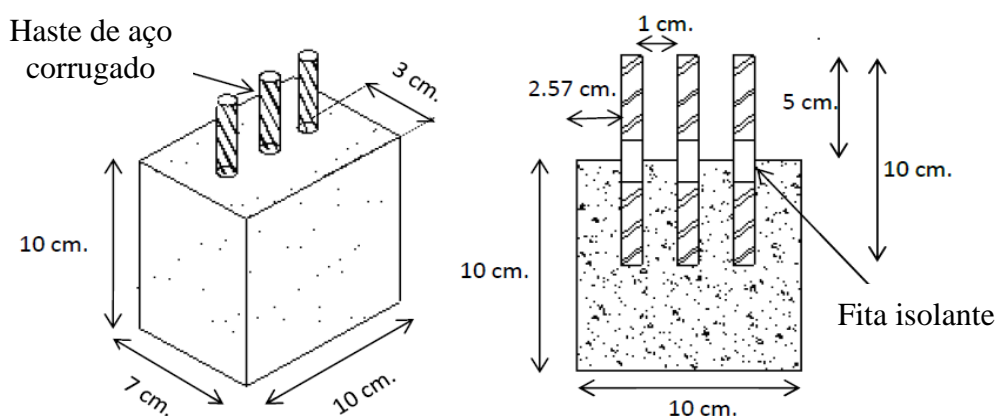


Figura 2. Geometria dos corpos de prova para ensaios eletroquímicos.

A fabricação dos corpos de prova de concreto foi muito semelhante ao procedimento descrito para a fabricação dos cubos de argamassa para os ensaios mecânicos. Nesse caso, a diferença no procedimento consistiu na colocação das três barras corrugadas de RS. Este processo foi realizado durante o processo de lançamento do concreto nas formas de madeira.

As armaduras foram limpas para evitar grande oxidação, graxa, poeira ou incrustações na superfície. Foram inspecionados visualmente para verificar se não havia fraturas, deformações ou imperfeições que afetassem a resistência ou adesão ao concreto. As hastes de aço de 10 cm foram enfaixadas no meio com fita isolante, de aproximadamente 2 cm, para evitar a entrada da solução por capilaridade. A área do aço em contato com o concreto foi de 13,35 cm² e foram confeccionados dois corpos de prova para cada revestimento utilizado, bem como para a amostra controle.

2.4. Ensaio de resistência à compressão.

As medidas de resistência à compressão das argamassas foram realizadas em sete corpos de prova em forma de cubo de 5 x 5 x 5 cm aos 28 dias de fabricação. Os corpos de prova foram colocados em uma prensa hidráulica garantindo o alinhamento vertical e horizontal em relação aos eixos do equipamento. Três corpos de prova foram testados para cada agregado incorporado na argamassa, bem como para a amostra controle. No momento da falha de ruptura devido à pressão da prensa, o equipamento parou e deu um valor representado como a força máxima de ruptura. Este valor é dividido pela área da seção transversal do cubo, obtendo-se assim a resistência à compressão (f'_c). Os valores de f'_c para as amostras com agregados foram comparados com o f'_c de projeto da amostra controle, de acordo com a norma (ASTM C109, 2016). O equipamento de compressão e medição é um modelo 300DX, marca SATEC.

2.5. Medição das técnicas eletroquímicas.

2.5.1. Curvas de polarização (PC).

Foi realizada a aquisição e análise dos dados eletroquímicos obtidos com a técnica de PC, conforme representado na Figura 3.

1. Aplicação da técnica de PC para obtenção de dados de densidade e potencial de corrente, de acordo com os parâmetros operacionais estabelecidos no estudo.
2. Representação gráfica com software OriginPro dos dados obtidos para cada PC.
3. Determinação dos parâmetros eletroquímicos de cada PC, tais como: potencial de corrosão (E_{corr}), densidade de corrente de passivação, faixa de potencial de passivação e potencial de corrosão.
4. Comparação de todos os parâmetros eletroquímicos para determinar o efeito do revestimento orgânico, de acordo com as variáveis medidas no estudo.

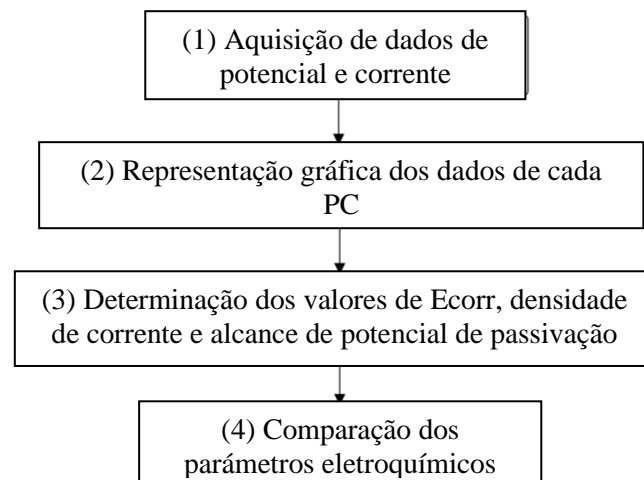


Figura 3. Diagrama de blocos para a análise dos dados obtidos pela técnica de PC.

Para as medições de PC, utilizou-se um arranjo de três eletrodos, usando um eletrodo de Calomel

saturado (SCE) como referência, um eletrodo de trabalho (tubos de ensaio encapsulados) e uma barra de grafite como contra-eletrodo. Os parâmetros operacionais foram os seguintes: potencial de varredura de -200 mV abaixo do E_{corr} e até +1000 mV, e velocidade de varredura de 100 mV / min. Um copo de 250 ml foi usado como um recipiente para os eletrodos e a solução simulada.

O SCE e o eletrodo de grafite foram colocados lado a lado e o mais próximo possível do eletrodo de trabalho dentro da solução simulada. Uma vez que todos os eletrodos foram colocados na solução, adotou-se um tempo de espera de 30 min antes de iniciar o ensaio para que o valor de E_{corr} se estabilizasse (Gholamhosseinzadeh et. Al., 2019). Os experimentos foram realizados triplamente para cada quantidade de quitosana, tipo de solvente, número de camadas, tempo de armazenamento, bem como para a amostra controle, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de amostras por cada variável medida pela técnica de PC.

Quantidade de amostras por variáveis medidas dos corpos de prova encapsulados pela técnica de PC										
Concentração do revestimento	Dissolventes			Tempo de armazenamento			Número de camadas			
	Vinagre de maçã	Ácido acético	Vinagre branco	Dez. 2015	Mai. 2016	Mar. 2017	1	2	3	4
0 (Controle)	3						3			
0.1	3	3		3	3	3				
0.2	3	3								
0.3	3	3								
0.4	3	3								
0.5	3	3	3				3	3	3	3
0.6	3	3								
0.8	3	3								
1	3	3								

Primeiramente, os revestimentos obtidos nos solventes de ácido acético e vinagre de maçã foram avaliados para a quantidade de 0,1 g e até 1 g de quitosana. Em seguida, foi analisado o comportamento para a concentração de 0,5 g do revestimento obtido no vinagre de maçã e comparado com o PC para a mesma concentração do revestimento obtido no vinagre branco de álcool de cana-de-açúcar. Além disso, o revestimento de 0,1 g de quitosana dissolvido em vinagre de maçã e armazenado por um e dois anos foi avaliado para analisar seu desempenho em função do tempo. Por fim, foi analisado o comportamento do revestimento para a concentração de 0,5 g em função das quantidades de camadas aplicadas na superfície metálica.

2.5.2. Potencial de meia célula.

A medição do HCP foi realizada em um SCE e por meio de um multímetro. A leitura foi feita nas três barras de aço embutidas no concreto e os valores das três medições foram calculados para obter o valor final. A primeira leitura foi feita no início da cura das amostras. Foi levado em consideração em cada medição que o SCE estava muito próximo ao eletrodo de trabalho e dentro da solução agressiva, sem tocar no fundo do recipiente. De acordo com o critério de probabilidade de corrosão de acordo com a norma (ASTM C876, 2015) em relação aos valores de E_{corr} , os seguintes intervalos mostrados na Tabela 4 são descritos (Pérez-Quiroz et. Al., 2008; Taji et. Al., 2018; Díaz-Blanco et. Al., 2019).

Tabela 4. Critérios de potencial segundo a norma ASTM C876.

Valores de E_{corr} pela técnica de HCP (mV) vs SCE	Critério de probabilidade de corrosão
> -125	Probabilidade de corrosão de 10%
-126 a -275	Risco de corrosão intermediário
< -276	Probabilidade de corrosão de 90%

2.5.3. Resistência à polarização linear (LPR).

A técnica LPR tem sido usada nas últimas décadas como uma ferramenta poderosa para a análise de corrosão CRS (Feliu et. Al., 1989; Papavinasam, 2008; Zhou et. Al., 2018). Para a medição do LRP, um arranjo de três eletrodos foi usado: um contra-eletrodo de grafite, o SCE como eletrodo de referência e a barra de aço como eletrodo de trabalho; com uma medição por amostra de acordo com os dias de ensaio estabelecidos. Ambos os eletrodos foram colocados o mais próximo possível do eletrodo de trabalho, próximo ao bloco de concreto e dentro da solução de NaCl a 3%, conforme mostrado na Figura 4.

A técnica LPR foi medida segundo a norma (ASTM G59, 2014), com parâmetros operacionais de ± 20 mV em relação a E_{corr} , com velocidade de varredura de 10mV / min e foi plotada em função do tempo. O equipamento de medição usado foi um Potenciostato / galvanostato / ZRA, Gamry Instruments, interface 1000, software de estrutura Gamry. A resistência à polarização (R_p) pode ser determinada como a inclinação do PC ao redor do E_{corr} (Andrade e Alonso, 1996; Díaz Blanco et. Al., 2019). A Tabela 5 mostra as faixas de densidade de corrente (I_{corr}) e taxa de corrosão (CR), bem como o estado das barras de aço de acordo com o grau de avanço da corrosão (Andrade e Martínez, 2010).

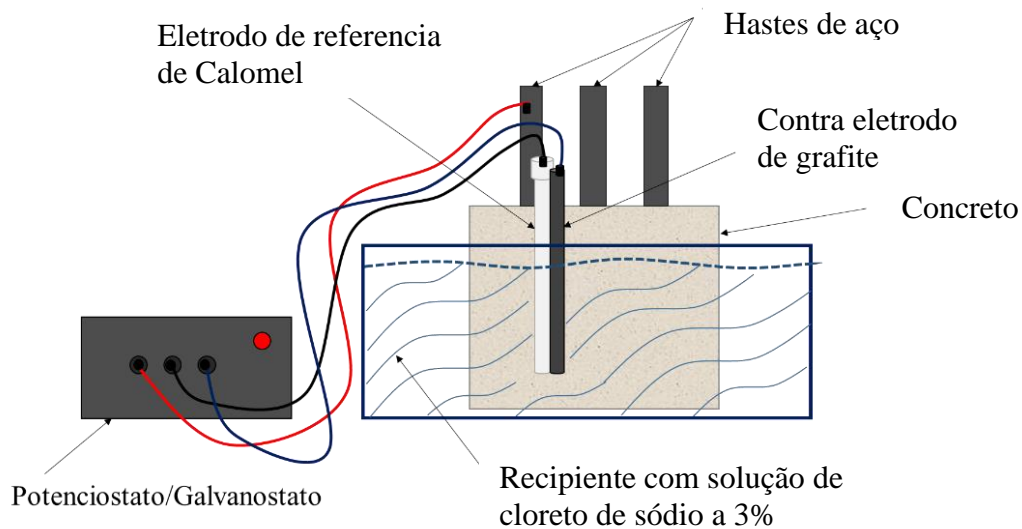


Figura 4. Representação da célula eletroquímica para a medição da LPR.

Tabela 5. Critérios de I_{corr} e CR em termos de vida útil.

Corrente de corrosión I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/y)	Condição das barras de aço
$I_{corr} < 0.1$	<0.001	Desprezível.
$I_{corr} 0.1 - 0.5$	0.001-0.005	Corrosão de baixa a moderada.
$I_{corr} 0.5 - 1.0$	0.005-0.010	Corrosão de moderada a elevada.
$I_{corr} > 1.0$	> 0.010	Corrosão elevada.

2.5.4. Ruído eletroquímico (EN).

A aquisição e análise dos dados obtidos pela técnica EN foram realizadas seguindo o diagrama de blocos, representado na Figura 5.

1. Aplicação da técnica EN para aquisição de sinais EN, a partir dos parâmetros operacionais estabelecidos.
2. Processamento de sinais de potencial de ruído eletroquímico (EPN) e de corrente de ruído eletroquímico (ECN) usando o método de regressão linear.
3. Determinação de parâmetros eletroquímicos como: desvio padrão do ruído em tensão (σ_v), desvio padrão do ruído na corrente (σ_i) e resistência ao ruído (R_n); por meio do método estatístico (SM).
4. Representação gráfica e comparação dos dados R_n em função do tempo entre as diferentes amostras de concreto.

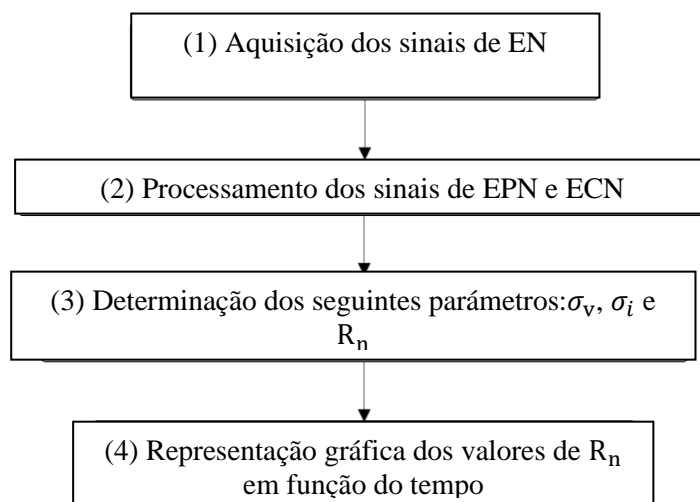


Figura 5. Diagrama de blocos para a análise dos dados de EN.

Para a medição da EN, foi utilizado o método padrão de análise de três eletrodos (hastes de aço embutidas no concreto) nominalmente "idênticos" (Genesca et. Al., 2002), fazendo uma medição para cada amostra de concreto de acordo com os dias dos ensaios designados. O equipamento utilizado foi um potenciostato ZRA automático da ACM Instruments. Uma frequência de amostragem de 1 dado/s foi usada e as leituras foram 1.024 dados registrados. R_n é um dos parâmetros mais utilizados para o estudo de sinais de ruído. Por analogia com a lei de Ohm, R_n foi determinado, definido como a relação entre σ_v e σ_i (Sanchez-Amaya et. Al., 2005). Para o processamento dos dados em potencial e corrente, foi realizada uma eliminação da tendência da série temporal pelo método de regressão linear (Mansfeld et. Al., 2001).

2.6. Caracterização superficial. Microscópio eletrônico de varredura (SEM).

As amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro para lhes dar propriedades condutoras. Amostras de hastes de aço com revestimentos feitos de quitosana dissolvida em vinagre de maçã foram estudadas. A amostra de trabalho não revestida também foi analisada. O equipamento de medição é LEO 1450 VP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resistência à compressão.

Na Figura 6 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova com os diferentes agregados propostos, com o objetivo de observar se houve melhorias nas propriedades mecânicas da argamassa (Aydin e Saribiyik, 2010).

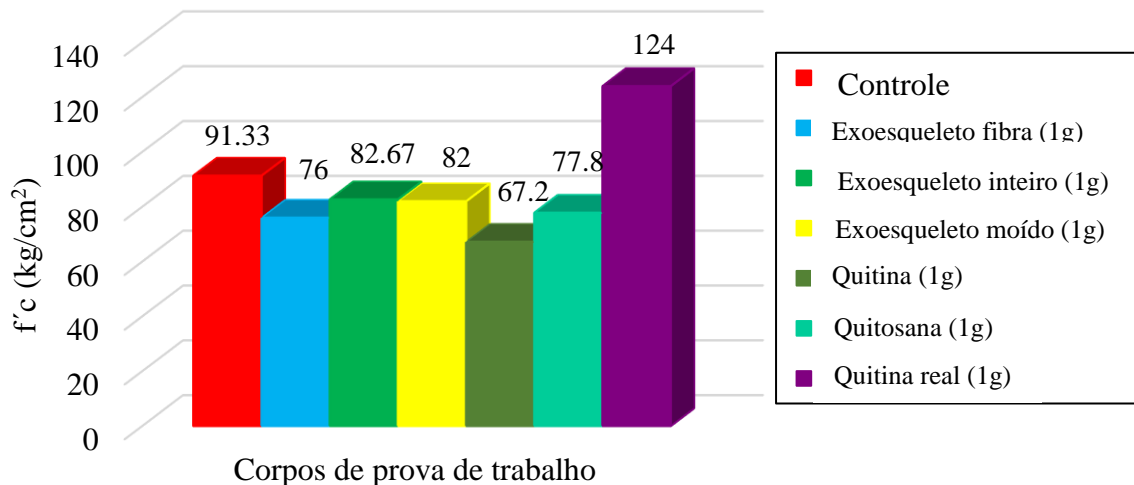


Figura 6. Gráfico de ensaios de resistência à compressão em corpos de prova de argamassa com diferentes agregados a 28 dias de cura.

Como pode ser visto, os valores de resistência à compressão com o uso dos diferentes agregados (exoesqueleto inteiro, fibra e moído) diminuíram entre 9 e 17% em relação à resistência da amostra controle. No caso da quitina e da quitosana, os valores de resistência diminuem em até 26%. Alguns autores relatam o efeito retardador da quitosana na hidratação do cimento, que atua como um agente modificador da viscosidade, possivelmente devido à interação entre o biopolímero e os compostos do cimento (Cano-Barrita e León-Martínez, 2016).

Em contraste, uma resistência de 136% foi alcançada para a amostra contendo quitina grau reagente, com partículas retidas na malha 100 (150 μm). Segundo Bezerra, a quitina em misturas cimentícias pode formar redes poliméricas que melhoram as propriedades mecânicas ao incorporar os hidratos da pasta de cimento em suas cadeias (Bezerra, 2016), conseqüentemente os cubos de argamassa resultantes seriam possivelmente mais compactos. Certamente a forma e o pequeno tamanho das partículas desempenharam um papel muito importante (Page et. Al., 1990), influenciando o conteúdo de vazios do material compósito, a compactação e conseqüentemente a resistência à compressão (Zhou et. Al., 2019).

3.2. Técnicas eletroquímicas.

3.2.1. Curvas de polarização.

A Figura 7 mostra os gráficos de PC para os tubos de ensaio encapsulados revestidos com diferentes quantidades de quitosana dissolvida em ácido acético e vinagre de maçã e imersos em uma solução de hidróxido de cálcio com cloreto de cálcio. Ambos os gráficos apresentam comportamento semelhante, observando-se valores de E_{corr} mais nobres para as amostras revestidas com baixas quantidades de quitosana. Ao contrário, o E_{corr} torna-se mais ativo para a amostra controle e as amostras com os revestimentos que contêm a maior quantidade de quitosana dissolvida, exceto para a amostra com o revestimento de 0,5g em ácido acético que apresenta um potencial de corrosão mais nobre.

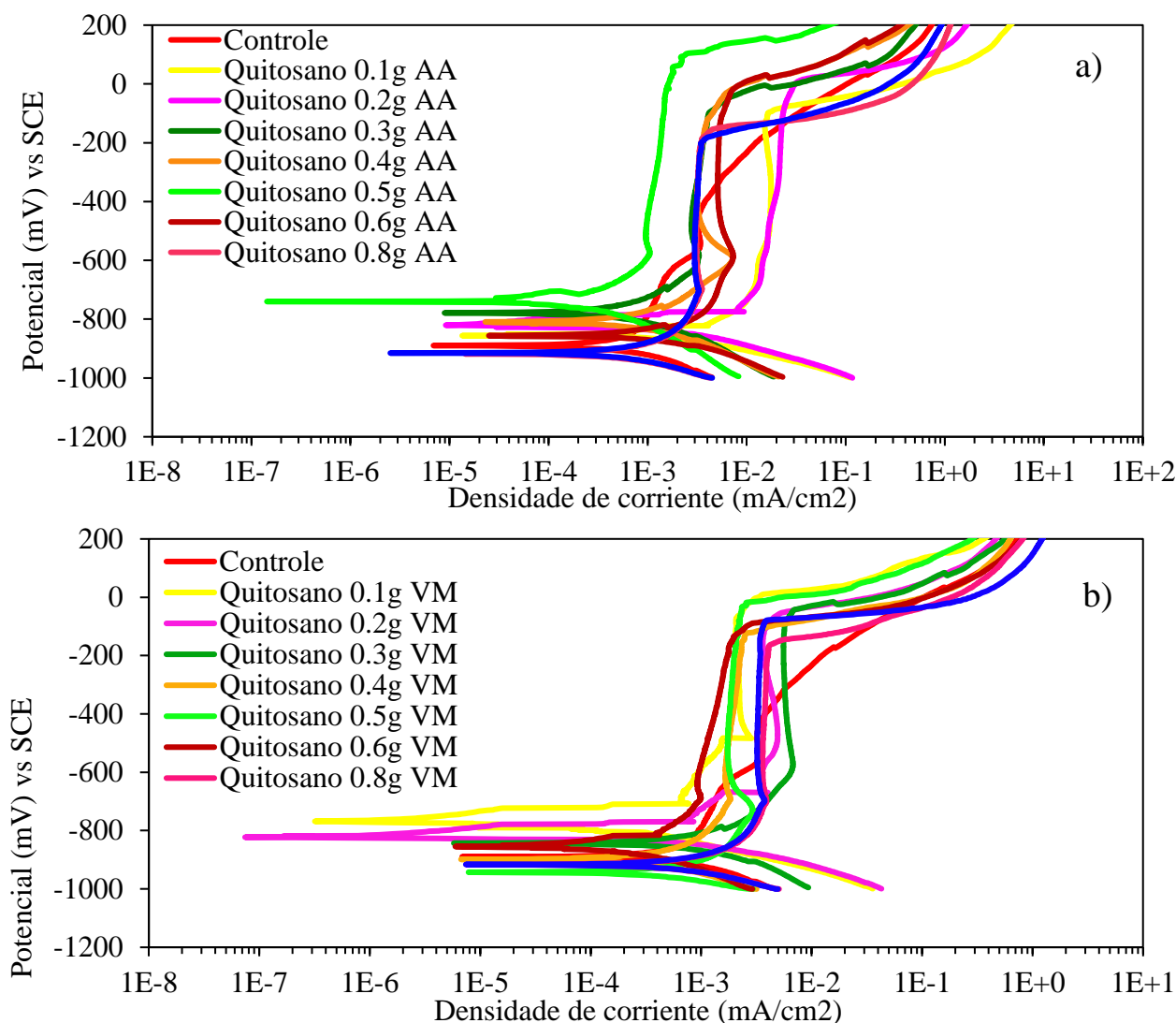


Figura 7. Curvas de polarização de tubos de ensaio revestidos com quitosana dissolvidos em a) ácido acético e b) vinagre de maçã, expostos a uma solução de hidróxido de cálcio com cloreto de cálcio.

Todas as amostras revestidas exibem uma região de passividade entre aproximadamente -800 e -100 mV. O comportamento observado sugere a oxidação do metal com a posterior formação de uma camada passiva mais estável na presença do revestimento como barreira física. A quitosana como polissacarídeo é um polímero orgânico adequado como revestimento devido à sua alta aderência a substratos metálicos (Carneiro et. Al., 2015). Essa propriedade é aumentada devido ao fato de a quitosana e seus derivados apresentarem notória facilidade de funcionalização química (Ashassi-Sorkhabi e Kazempour, 2020).

As densidades de corrente de passivação são próximas a $1\text{E-}3 \text{ mA/cm}^2$, enquanto a amostra de controle mostra valores de densidade de corrente de passivação mais altos. O início da região de passivação para todas as amostras é muito semelhante, mas a amostra de controle mostra uma tendência de aumentar a densidade de corrente, o que significa que a camada passiva não é tão estável.

O corpo de prova com revestimento de 0,5 g de quitosana tem uma faixa de potencial de passivação maior (maior estabilidade da camada passiva) do que os outros corpos de prova, com potencial de rosa próximo a +200 mV para a amostra com revestimento dissolvido em ácido acético (AA) e -10

mV para o revestimento dissolvido em vinagre de maçã (VM). Portanto, a quantidade de 0,5 g de quitosana dissolvida no vinagre de maçã foi considerada o melhor revestimento, que atua como uma barreira física contra a entrada de agentes agressivos como íons cloreto (Carneiro et. Al., 2013).

Na Figura 8a, é visto o gráfico de PC para a quantidade de 0,5 g de quitosana dissolvida em vinagre de maçã em relação ao solvente de vinagre branco de álcool de cana-de-açúcar. Pode-se observar que a amostra com revestimento dissolvido em vinagre branco não apresentou zona de passivação, mas sim zona de formação de produtos de corrosão. Isso confirma o uso do vinagre de maçã como o melhor solvente da quitosana, com a conseqüente formação do melhor revestimento.

Sendo a quitosana um biopolímero orgânico, seria de esperar uma degradação do composto em função do tempo. Nesse sentido, foi preparada uma concentração de 0,1 g de quitosana dissolvida em vinagre de maçã e armazenada em recipiente fechado por 17 meses. O efeito do tempo de armazenamento e posterior aplicação na superfície metálica foi observado por meio da técnica de PC, conforme representado na Figura 8b.

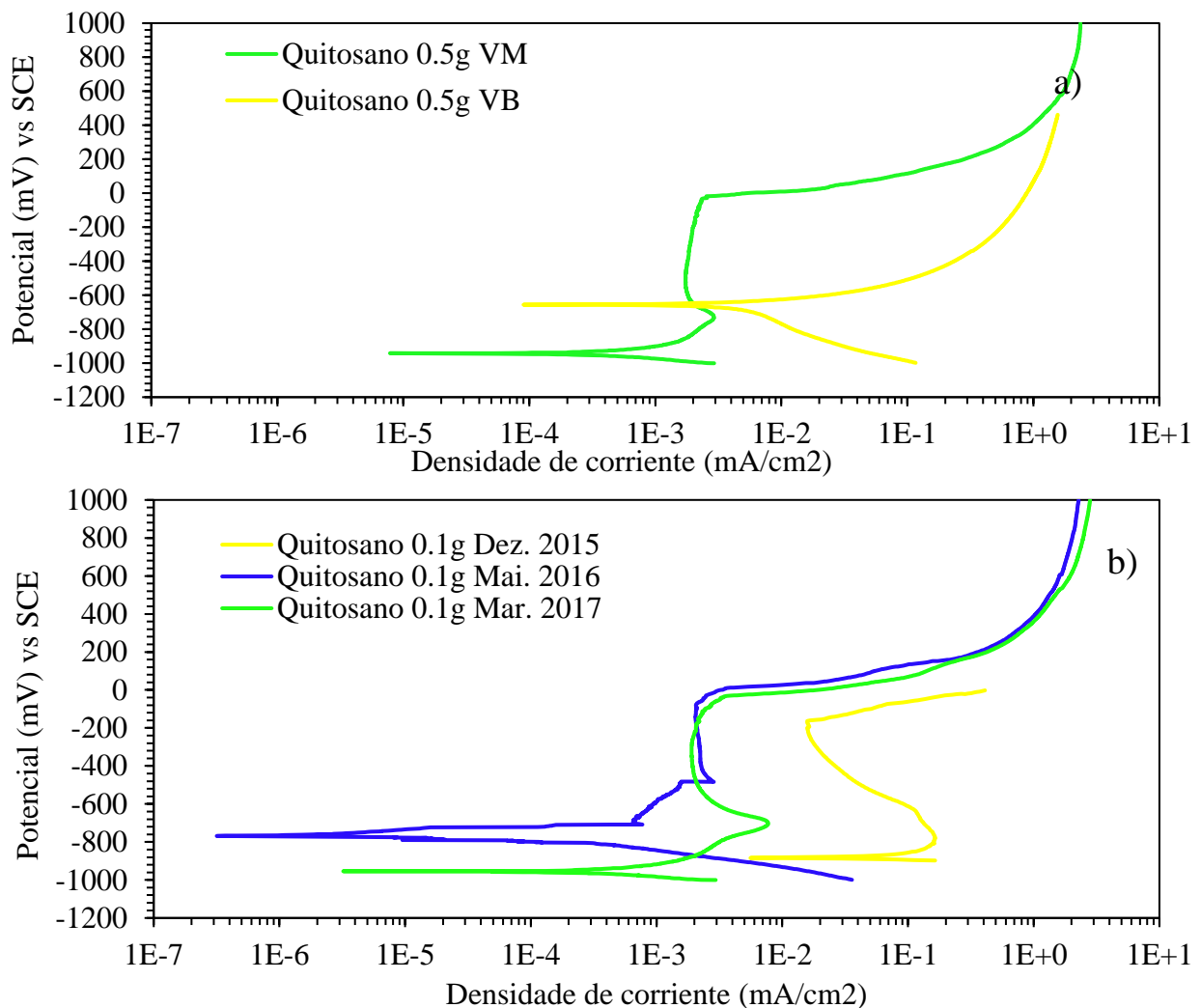


Figura 8. Curvas de polarização de tubos de ensaio com a) revestimento de quitosana dissolvido em vinagre branco de álcool de cana e vinagre de maçã e b) revestimento de quitosana armazenado e dissolvido em vinagre de maçã; exposto à solução simulada.

Como pode ser visto, após 5 meses de armazenamento o revestimento de quitosana melhorou consideravelmente seu desempenho. A corrente de passivação diminuiu em relação à primeira

aplicação em mais de três ordens de magnitude. Após 17 meses de armazenamento, a faixa de potencial de passivação foi maior entre -1000 e 50 mV e a corrente de passivação foi duas ordens de magnitude menor em relação à primeira aplicação. A preservação a longo prazo, as propriedades de adesão favoráveis, as possíveis interações de quimissorção e fisissorção da quitosana na superfície do metal e a disponibilidade de heteroátomos N e O no revestimento são algumas das características que afetam diretamente seu comportamento anticorrosivo (Ashassi-Sorkhabi e Kazempour, 2020).

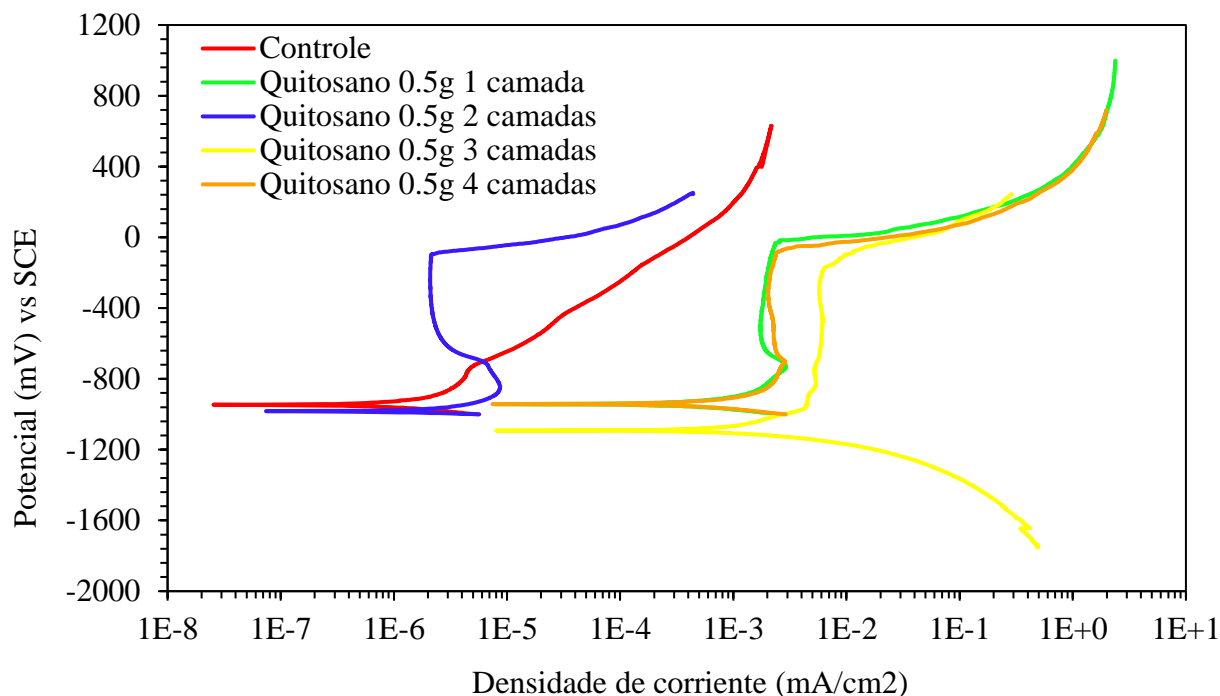


Figura 9. Curvas de polarização de tubos de ensaio com diferentes camadas (dip coating) de recobrimento de quitosana em vinagre de maçã, em solução de hidróxido de cálcio com cloreto

A Figura 9 mostra o CP dos tubos de ensaio encapsulados, com e sem revestimento de quitosana dissolvido em vinagre de maçã e com concentração de 0,5 g. Foram feitos de um a quatro imersões, formando uma camada para cada imersão.

Nos gráficos, os valores de E_{CORR} são apresentados para todas as amostras em torno de -950 mV. A amostra com duas camadas e a amostra de controle têm uma densidade de corrente de passivação inferior de $1E-6$ mA/cm², com valores de até três ordens de magnitude inferiores aos valores relatados para as amostras com uma, três e quatro camadas do revestimento.

Isso possivelmente se deve ao fato dos corpos de prova com maior número de camadas apresentarem baixa adesão nas bordas do metal (fenda entre o metal e o encapsulamento do epóxi). Por outro lado, a amostra com duas camadas de revestimento apresentou zona de passivação bem definida, com potencial de pinçamento próximo a -50 mV, por outro lado, o ramo anódico da amostra controle é diferente por apresentar aumento significativo de densidade de corrente, associada à formação de produtos de corrosão no aço. Gebhardt et al. relatam comportamento semelhante do ramo anódico para o substrato, com e sem revestimento de quitosana, demonstrando seu efeito favorável à corrosão (Gebhardt et. Al., 2012). Isso sugere que o melhor revestimento é o de duas camadas, a primeira cobre o metal e a segunda sela os poros ou defeitos presentes na primeira camada.

3.2.2. Parâmetros eletroquímicos como: E_{corr} , R_n , R_p e I_{corr} .

A Figura 10 apresenta os resultados da variação do E_{corr} em função do tempo para o SR embutido no concreto revestido com 0,5 g de quitosana dissolvida em vinagre de maçã (0,5 g VM) e em ácido acético (0,5 g AA).

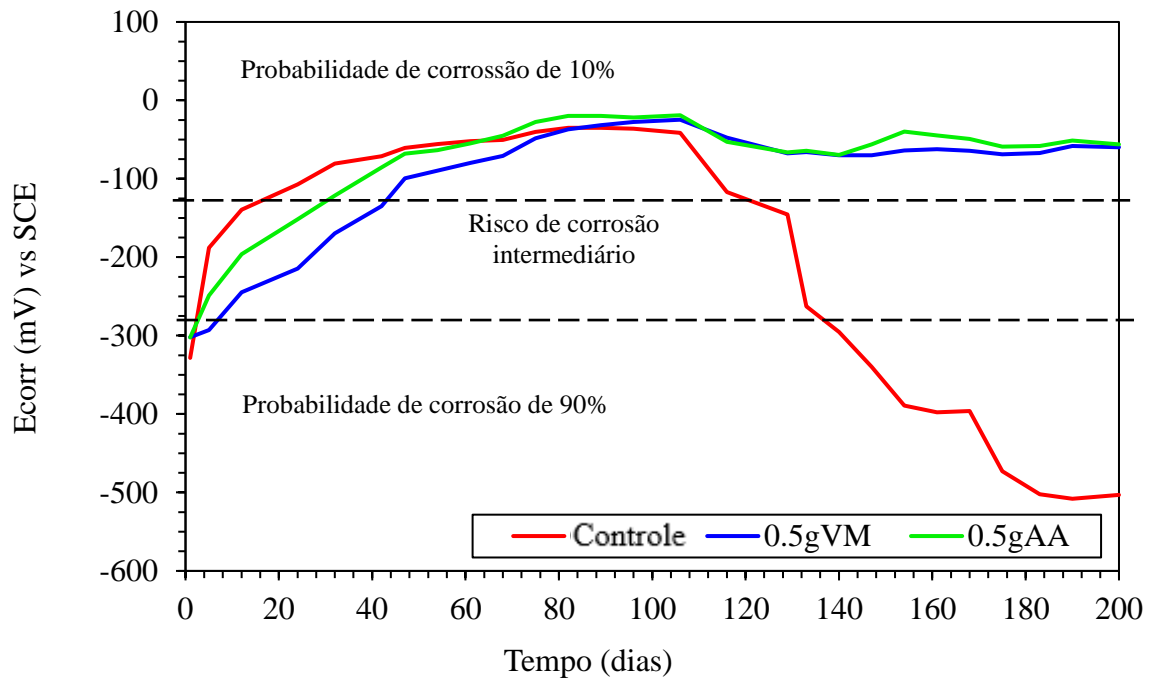


Figura 10. Variação de E_{corr} ao longo do tempo para aço revestido e não revestido embutido em concreto e exposto a uma solução de NaCl a 3%.

No início do período de ensaio (cura do concreto) a amostra controle atinge rapidamente valores de E_{corr} muito nobres, próximos a -100 mV para o dia 28; o aço sob condições de alta alcalinidade, presença de umidade e oxigênio forma uma camada passiva de óxidos que protege o metal na ausência de íons agressivos (Hansson, 1984). Os corpos de prova revestidos atingiram esses valores de E_{corr} próximos aos 40 e 50 dias de ensaio, possivelmente devido à presença do revestimento que retardou a formação da camada de óxido passivo.

A longo prazo, pode-se observar que ambos os tubos de ensaio com revestimento dissolvido em vinagre de maçã ou ácido acético apresentam 10% de probabilidade de corrosão, tendo um comportamento constante do dia 100 ao dia 200. Por outro lado, a amostra sem o revestimento no dia 100 começa a apresentar queda drástica do E_{corr} , localizando-se do dia 160 ao dia 200 na área com 90% de probabilidade de corrosão de acordo com os critérios estabelecidos (Taji et. al., 2018). Comparando os dois corpos de prova com revestimento, pode-se observar que os E_{corr} são muito semelhantes e melhoram com o tempo de imersão. Este comportamento está associado ao revestimento de quitosana; possivelmente a alta aderência (Carneiro et. al., 2015), ausência de defeitos no filme (Hernández et. al., 2009), bem como a permanência das características físico-químicas do revestimento (Ashassi-Sorkhabi e Kazempour, 2020), limita que os íons cloreto atinjam o aço e causam a quebra da camada passiva (Alonso et. al., 2000). Foi relatado o efeito favorável dos revestimentos de quitosana ao aumentar a resistência contra a corrosão localizada (Gebhardt et. Al., 2012).

As Figuras 11a e 11b mostram os valores de R_p e R_n para as amostras de concreto com barras de aço revestido com quitosana, dissolvido em vinagre de maçã e ácido acético.

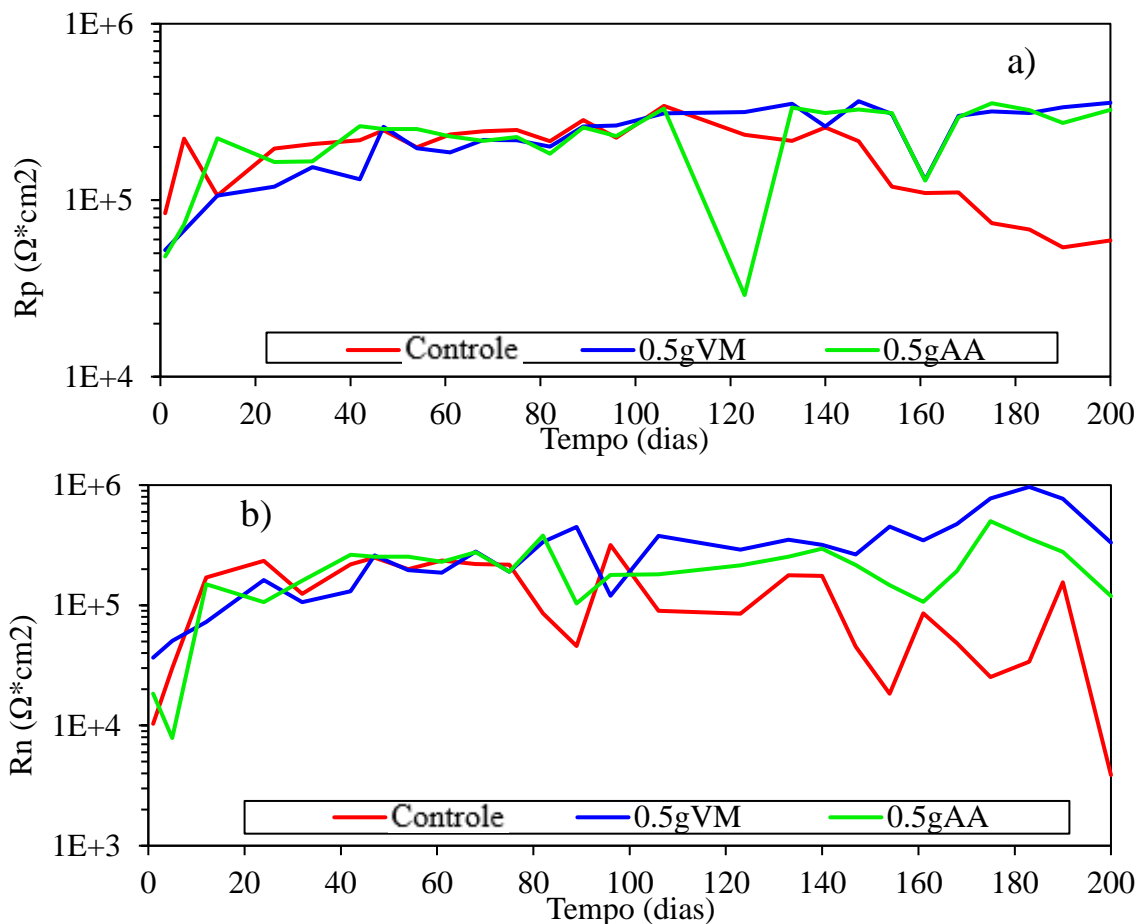


Figura 11. Variação de a) resistência à polarização linear e b) resistência ao ruído eletroquímico, para aço armado e não revestido embutido em concreto em solução de NaCl a 3%.

Ambos os resultados mostram uma tendência semelhante com um aumento nos valores de resistência durante os primeiros meses de ensaio. Entre os dias 80 e 110, a amostra controle começa a diminuir seu valor de R_p e R_n , talvez por sofrer rupturas da camada passiva sugerindo ataques em sua superfície e aumentando a taxa de corrosão.

A partir de uma regressão linear entre os valores de R_p e R_n , obteve-se um valor médio do coeficiente de correlação de 0,557. Alguns autores propõem, por analogia com a lei de Ohm, que R_p e R_n podem ser considerados equivalentes para muitos sistemas (Aballe et. Al., 2001; Girija et. Al., 2007; Díaz Blanco et. Al., 2019).

Todas as amostras apresentam pequenas variações nos valores de R_p , mas as amostras revestidas aumentam progressivamente seus valores até $3E + 5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, após 200 dias de ensaio. Esse comportamento pode ser devido a pequenos defeitos no revestimento, com possível ruptura e repassivação da camada passiva. A diferença entre os valores de R_p da amostra de controle e dos revestidos é de aproximadamente uma ordem de magnitude no final do ensaio (Hernández et. Al., 2009). Por outro lado, os valores de R_n , principalmente para a amostra controle, apresentam grandes oscilações após 110 dias de ensaios, devido à sensibilidade desta técnica capaz de detectar pequenas mudanças de potencial e corrente na superfície do metal. Além disso, a técnica EN é sensível ao tipo de corrosão localizada presente neste sistema.

A partir dos dados de R_p , a taxa de corrosão foi determinada em termos do I_{corr} usando a equação de Stern e Geary (Stern e Geary, 1957; Zhou et. Al., 2018), conforme mostrado na Figura 12. Nos resultados, um alto nível de corrosão é observada para a amostra de controle, localizada na zona de corrosão moderada a alta. As amostras de concreto que possuem hastes revestidas encontram-se na

zona de corrosão baixa a desprezível de acordo com os critérios estabelecidos na literatura (Andrade e Martínez, 2010), o que indica que o revestimento com ambos os solventes é eficaz como proteção contra a corrosão induzida por cloreto.

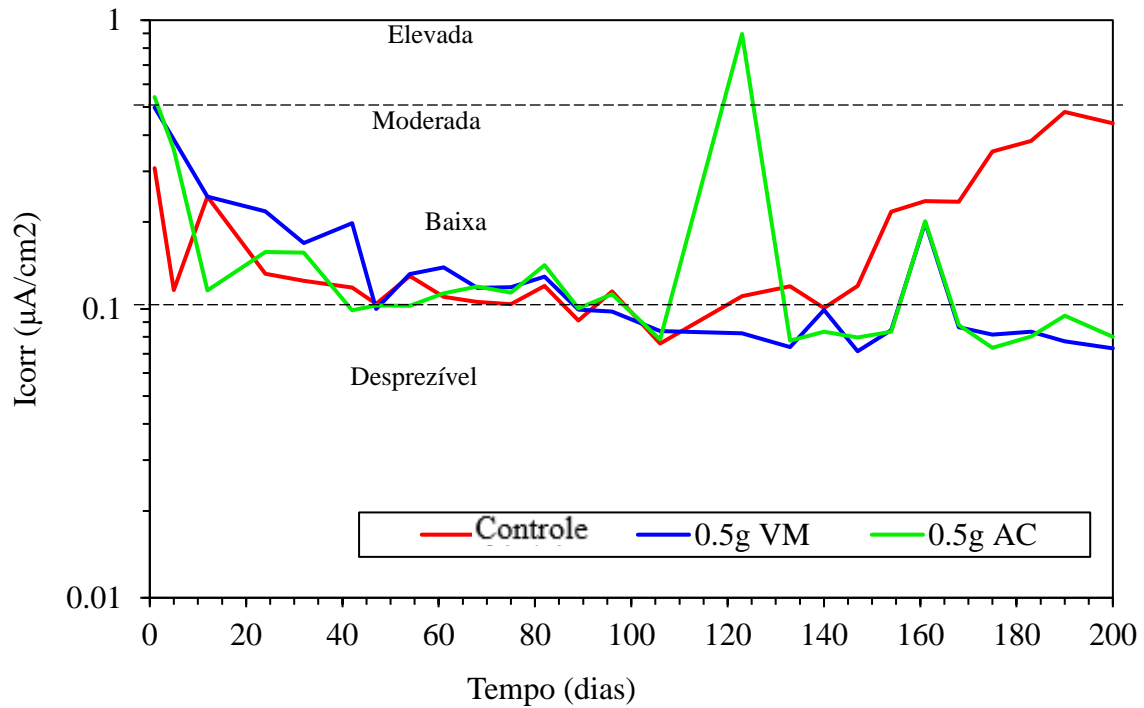


Figura 12. Gráfico de I_{corr} (velocidade de corrosão) do concreto para o RS com e sem revestimento, em solução de NaCl a 3%.

3.3. Caracterização.

3.3.1. Imagens do SEM.

A Figura 13 mostra a superfície metálica com o revestimento usando 0,1 e 1g de quitosana com vinagre de maçã como solvente.

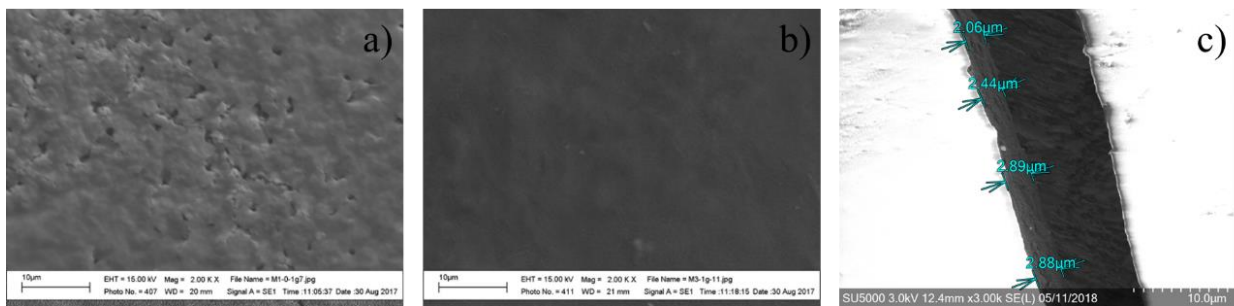


Figura 13. Micrografia de filme de revestimento comparativo a) 0,1g de quitosana com VM e b) 1g de quitosana com VM c) espessura do filme de revestimento.

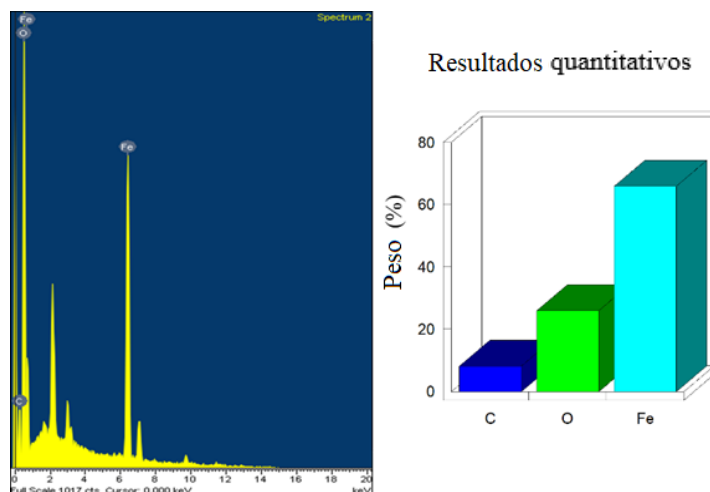


Figura 14. Análise química SEM elemental do recobrimento de 0,5g de quitosana com solvente maçã vinagre.

Pode-se observar que no primeiro caso (Figura 13a) o revestimento apresenta porosidades enquanto no segundo caso (Figura 13b) é mais homogêneo. Na micrografia (Figura 13c) e caracterização química elemental (Figura 14) que foi obtida por meio do MEV, observa-se a espessura do revestimento composto por 0,5g VM, com espessura de filme de 2,06 μ m a 2,89 μ m, sendo este um filme fino. A análise elemental apresenta apenas carbono do revestimento, oxigênio e ferro do metal base.

3.3.2. Observação visual das barras de aço.

Na Figura 15 é possível observar o estado real das hastes extraídas dos blocos de concreto, após 200 dias de exposição ao meio agressivo de NaCl a 3%.

A parte inferior representa a área que foi embutida no concreto e pode-se observar que as barra que estavam no corpo de controle apresentam alguns produtos de corrosão de cor laranja tênue, associados à ação do meio agressivo (setas vermelhas) que falam da boa proteção que só o concreto tem. Nas barras com recobrimento de quitosana, não são observados produtos de ferrugem, evidenciando o bom comportamento eletroquímico do recobrimento orgânico. Por fim, na parte superior das barras de aço, observam-se produtos de corrosão causados pela ação da atmosfera, sendo muito semelhantes em todas elas (setas pretas).

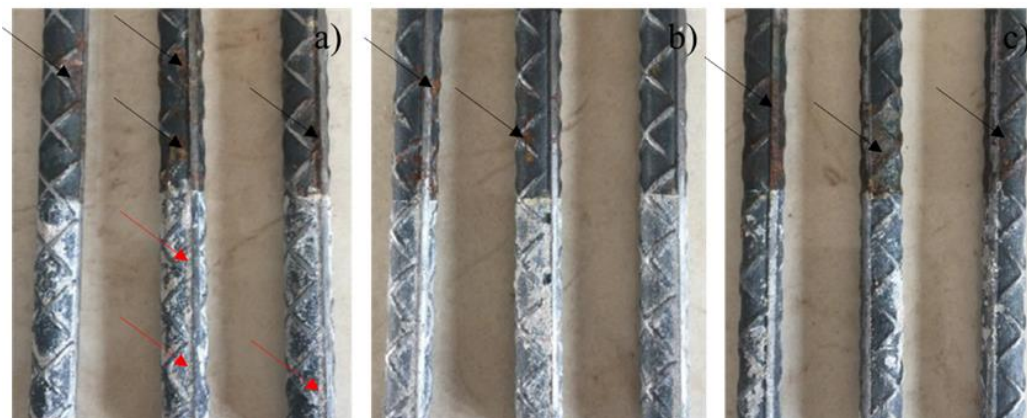


Figura 15. Estado físico das barras embutidas no concreto parcialmente submersas por 200 dias em solução de NaCl a 3% para a) amostra controle, b) aço revestido com 0,5g VM e c) aço revestido com 0,5g AA.

4. CONCLUSÕES

Os revestimentos à base de quitosana e solventes de ácido acético ou vinagre de maçã mostraram pouca diferença entre eles. A melhor quantidade de quitosana utilizada foi 0,5g, apresentando os melhores resultados com uma zona de passivação mais extensa, potencial de pite mais nobre e menor densidade de corrente.

O revestimento não apresenta degradação com o tempo de armazenamento e melhora ainda mais seu desempenho. Com duas imersões é obtida a melhor camada protetora, de acordo com os ensaios eletroquímicos do PC. A resistência à compressão apresentou melhora na presença de agregados de quitina grau reativo na mistura, em relação à amostra controle.

Com base nos resultados das técnicas eletroquímicas em amostras de CR, os valores de I_{corr} são obtidos em uma faixa de corrosão de desprezível a baixa de acordo com os critérios existentes. A presença da quitina como agregado do concreto e do revestimento de quitosana apresentam bom comportamento no RCS durante o tempo de exposição e podem contribuir para a melhoria das propriedades estruturais e ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México).

6. REFERÊNCIAS

- Aballe, A., Bautista, A., Bertocci, U., Huet., F. (2001), "*Measurement of the Noise Resistance for Corrosion Applications*", CORROSION. 57(1):35-42. <https://doi.org/10.5006/1.3290327>
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P. (2000), "*Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*", Cement and Concrete Research. 30:1047-1055. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00265-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00265-9)
- Anandhavelu, S., Dhanasekaran, V., Sethuraman, V., Park, H. J. (2017), "*Chitin and Chitosan Based Hybrid Nanocomposites for Super Capacitor Applications*", Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 17:1321-1328. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.12721>
- Andrade, C., Alonso, C. (1996), "*Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*", Construction and Building Materials. 10:315-328. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, C., Martínez, I. (2010), "*Techniques for measuring the corrosion rate (polarization resistance) and the corrosion potential of reinforced concrete structures*", in: Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. Elsevier W.P., cap. 14, pp. 284-316. <https://doi.org/10.1533/9781845699604.2.284>
- Ashassi-Sorkhabi, H., Kazempour, A. (2020), "*Chitosan, its derivatives and composites with superior potentials for the corrosion protection of steel alloys: A comprehensive review*", Carbohydrate Polymers. 237:116110. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116110>
- ASTM International (2003). *ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0033-03>
- ASTM International (2012). *ASTM C31/C31M-12, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-12
- ASTM International (2014). *ASTM C192/C192M-14, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-14
- ASTM International (2014). *ASTM G59-97, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>
- ASTM International (2015). *ASTM C876-15, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0876-15>

- ASTM International (2016). *ASTM C109/C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-16A
- Aydin, F., Saribiyik, M. (2010), "Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings", *Scientific Research and Essays*. 5(13):1644-1648.
- Bezerra, U. T. (2016), "Biopolymers with superplasticizer properties for concrete" in: *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*. Elsevier W.P., cap. 10, pp. 195-220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100214-8.00010-5>
- Cano-Barrita, P. F. J., León-Martínez, F. M. (2016) "Biopolymers with viscosity-enhancing properties for concrete" in: *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*. Elsevier W.P., cap. 11, pp. 221-252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100214-8.00011-7>
- Carneiro, J., Tedim, J., Fernandes, S. C. M., Freire, C. S. R., Gandini, A., Ferreira, M. G. S., Zheludkevich, M. L. (2013), "Functionalized chitosan-based coatings for active corrosion protection", *Surface and Coatings Technology*. 226:51-59. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.035>
- Carneiro, J., Tedim, J., Ferreira, M. G. S. (2015), "Chitosan as a smart coating for corrosion protection of aluminum alloy 2024: A review", *Progress in Organic Coatings*. 89:348-356. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.03.008>
- Castelló, M. E., Amalvy, J. I., Anbinder, P. S., Peruzzo, P. J. (2019) "Obtención Y Caracterización De Quitosano Y Películas Quitosano- Glicerol", 5º Jornadas ITE - Facultad de Ingeniería - UNPL. pp. 797-803.
- Díaz-Blanco, Y. et al. (2019) "Effect of Recycled PET (Polyethylene Terephthalate) on the Electrochemical Properties of Rebar in Concrete", *International Journal of Civil Engineering*. 18:487-500. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00478-3>
- Díaz Blanco, Y. 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>
- Dima, J. B., Zaritzky, N. E. (2019) "Quitosano obtenido de desechos de la industria pesquera y su aplicación como adsorbente de metales pesados", in: Perez, T. *Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío*. Buenos Aires, ANCEF, cap. 5, pp. 83-108.
- Dodson, V. H. (1990) "Water reducing chemical admixtures introduction", in: *Concrete Admixtures*. Springer, cap. 3, pp. 39-71. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4843-7_3
- Dodson, V., Hayden, T. (1989) "Another Look at the Portland Cement/Chemical Admixture Incompatibility Problem", *Cement, Concrete and Aggregates*. 11(1):52-56. <https://doi.org/10.1520/CCA10102J>
- Feliu, S., González, J. A., Andrade, M. C., Feliu, V. (1989) "Determining polarization resistance in reinforced concrete slabs", *Corrosion Science*. 29(1):105-113. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(89\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0010-938X(89)90083-8)
- Gacén, J., Gacén, I. (1996) "Quitina y quitosano. Nuevos materiales textiles", *Boletín Intexter (U.P.C)*. 110:67-71.
- Gebhardt, F., Seuss, S., Turhan M. C., Hornberger, H., Virtanen, S., Boccaccini, A. R. (2012) "Characterization of electrophoretic chitosan coatings on stainless steel", *Materials Letters*. 66:302-304. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.08.088>
- Genesca, J., Meas, Y., Rodríguez, F. J., Mendoza, J., Durán, R., Uruchurtu, J., Malo, J. M., Martínez, E. A., Arganiz, C., Pérez, T., Martínez, A., Chacón, J. G., Goana, C., Almeraya, F. M., González, J. G. (2002), "Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión". UNAM, D. F., México, p. 244.

- Gholamhosseinzadeh, M. R., Aghaie, H., Shahidi Zandi, M., Giahi, M. (2019), "*Rosuvastatin drug as a green and effective inhibitor for corrosion of mild steel in HCl and H₂SO₄ solutions*", Journal of Materials Research and Technology. 8(6):5314-5324. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.052>
- Girija, S., Kamachi Mudali, U., Khatak, H. S., Baldev Raj (2007), "*The application of electrochemical noise resistance to evaluate the corrosion resistance of AISI type 304 SS in nitric acid*", Corrosion Science. 49(11):4051-4068. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.04.007>
- Hansson, C. M. (1984), "*Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete*", Cement and Concrete Research. 14(4):574-584. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90135-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90135-2)
- Hernández Cocolletzi, H., Águila Almanza, E., Flores Agustin, O., Viveros Nava, E. L., Ramos Cassellis, E. (2009), "*Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón*", Superficies y Vacío. 22(3): 57-60.
- Hernández, M., Genescá J., Uruchurtu, J., Barba, A. (2009), "*Correlation between electrochemical impedance and noise measurements of waterborne coatings*", Corrosion Science. 51:499-510. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.12.011>
- Hostalet Alba, F. (1994), "*Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo del hormigón*", Informes de la Construcción. 46(433):19-31. <https://doi.org/10.3989/ic.1994.v46.i433.1114>
- Knorr, D. (1991), "*Recovery and Utilization of Chitin and Chitosan in Food Processing Waste Management*", Food Technology, 45:114-122.
- Mansfeld, F., Sun, Z., Hsu, C. H. (2001), "*Electrochemical noise analysis (ENA) for active and passive systems in chloride media*", Electrochimica Acta. 46:3651–3664. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(01\)00643-0](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00643-0)
- Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Hernández-López, S., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., Menchaca-Campos, C. (2005), "*Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers*", Polymer Engineering & Science. 45(10):1426-1431. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20418>
- O Reilly, V. (2007), "*Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño*". IMCYC, D.F., México, p. 207.
- Pacheco, N. (2010), "*Extracción biotecnológica de quitina para la producción de quitosanos: caracterización y aplicación*", Food and Nutrition. Université Claude Bernard; Université autonome métropolitaine (Universidad Autónoma Metropolitana) (Iztapalapa), p. 124
- Page, C. L., Treadaway, K. W. J., Bamforth, P. B. (1990), "*Corrosion of reinforcement in concrete*". Elsevier Applied Science, London-New York. p. 612.
- Pakdel, P. M., Peighambaroust, S. J. (2018), "*Review on recent progress in chitosan-based hydrogels for wastewater treatment application*", Carbohydrate Polymers. 201:264-279. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.070>
- Papavinasam, S. (2008), "*Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring*", in: Yang, L. Techniques for Corrosion Monitoring. Elsevier W.P., cap. 3, pp. 49-85. <https://doi.org/10.1533/9781845694050.1.49>
- Pech-Canul, M. A., Castro, P. (2002), "*Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere*", Cement and Concrete Research, 32(3): pp. 491-498. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00713-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00713-X).
- Pérez-Quiroz, J. T., Terán, J., Herrera, M. J., Martínez, M., Genescá, J. (2008), "*Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation*", Journal of Constructional Steel Research. 64(11):1317-1324. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.024>
- Sanchez-Amaya, J. M., Cottis, R. A., Botana, F. J. (2005), "*Shot noise and statistical parameters for the estimation of corrosion mechanisms*", Corrosion Science. 47:3280-3299.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.047>

Shrinivas Rao, M., Aye Nyein, K., Si Trung, T., Stevens, W. F. (2007), "*Optimum parameters for production of chitin and chitosan from squilla (S. empusa)*", Journal of Applied Polymer Science. 103:3694-3700. <https://doi.org/10.1002/app.24840>

Sousa Andrade, V., de Barros Neto, B., Fukushima, K., de Campos-Takaki, G. M. (2003), "*Effect of medium components and time of cultivation on chitin production by Mucor circinelloides (Mucor javanicus IFO 4570) - A factorial study*", Revista Iberoamericana de Micologia. 20:149-153.

Stern, M., Geary, A. L. (1957), "*Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves*", Journal of The Electrochemical Society, 104(1):56-63. <https://doi.org/10.1149/1.2428653>

Taji, I., Ghorbani, S., de Brito, J., Tam, V. W. Y., Sharifi, S., Davoodi, A., Tavakkolizadeh, M. (2018), "*Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust*", Journal of Cleaner Production. 210:837-846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.091>

Taylor, H. F. W. (1990), "*Cement Chemistry*". Thomas Telford, London, p. 437.

Zhou, B., Gu, X., Guo, H., Zhang, W., Huang, Q. (2018), "*Polarization behavior of activated reinforcing steel bars in concrete under chloride environments*", Construction and Building Materials. 164:877-887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.187>

Zhou, S., Zhang, S., Shen, J., Guo, W. (2019), "*Effect of cattle manure ash's particle size on compression strength of concrete*", Case Studies in Construction Materials. 10:e00215. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00215>

Avaliação da migração de cloretos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro

L. V. Dias¹, S. M. Soares², J. A. Salvador Filho² , F. G. S. Ferreira^{1*} 

* Autor de Contato: fgiannotti@ufscar.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.512>

Recepção: 12/09/2020 | Aceitação: 11/03/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O pó de vidro incorporado ao concreto convencional vem sendo estudado em relação à sua influência na resistência mecânica e durabilidade. Este trabalho visa avaliar a durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD) com substituição parcial do cimento por vidro finamente moído, por meio do ensaio de migração de cloretos utilizando o método da NT Build 492. Para tanto foram moldados corpos de prova com teores de pó de vidro de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% em relação ao volume de cimento e a avaliação foi feita na idade de 28 dias. Os resultados indicam que, em teores baixos, o pó de vidro não prejudica as propriedades dos compósitos e em teores mais altos os compósitos mantêm boas características mecânicas e de durabilidade.

Palavras-chave: compósito cimentício; pó de vidro; migração de cloretos.

Citar como: Dias, L. V., Soares, S. M., Salvador Filho, J. A., Ferreira, F. G. S. (2021), "Avaliação da migração de cloretos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 61 – 75, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.512>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Caraguatatuba, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor L. V. Dias contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão, redação e preparação do texto original (30%); S. M. Soares contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão (30%); J. A. Salvador Filho contribuiu com a conceituação, supervisão, discussão dos resultados, redação e revisão (20%) e F. G. S. Ferreira contribuiu com a conceituação, supervisão, discussão dos resultados, redação e revisão (20%).

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Evaluation of chloride migration in ultra-high performance concrete (UHPC) with glass powder

ABSTRACT

The influence of glass powder incorporation to ordinary concrete regarding mechanical and durability properties has been studied. This work aims to evaluate the durability of ultra-high performance cementitious composites (UHPC) with partial substitution of Portland cement by glass powder, through chloride migration test according to the NT Build 492 methodology. With this aim, specimens with 0%, 10%, 20%, 30% and 50% content of glass powder by weight of Portland cement were cast, cured in lime saturated water until the age of 28 days. The results indicate that minor contents of glass powder do not harm the concrete properties and higher contents maintain good mechanical and durability characteristics.

Keywords: cementitious composite; glass powder; chloride migration.

Evaluación de la migración de cloruro en compuestos cementosos de ultra alto rendimiento con polvo de vidrio

RESUMEN

Se ha estudiado la incorporación de polvo de vidrio en el hormigón convencional por su influencia en la resistencia mecánica y la durabilidad. Este trabajo tiene como objetivo validar la durabilidad de los compuestos cementosos de ultra alto desempeño (CCUAD) con reemplazo parcial de cemento por vidrio finamente molido, a través del ensayo de migración de cloruros, utilizando el método NT Build 492. Para ello, fueron moldeadas probetas conteniendo valores de 0%, 10%, 20%, 30 % y 50% de polvo de vidrio en relación al volumen de cemento, y la evaluación se realizó a los 28 días de edad. Los resultados indican que, con valores bajos, el polvo de vidrio no perjudica las propiedades de los compuestos y, a niveles superiores, los compuestos mantienen características mecánicas y durabilidad adecuadas.

Palabras clave: compuesto cementoso; polvo de vidrio; migración de cloruro.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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 termo concreto de ultra alto desempenho foi usado pela primeira vez por de Larrard e Sedran (1994). Geralmente se refere a um compósito de alta resistência a compressão (chegando a 4 vezes a resistência de concretos convencionais), de acordo com Bahedh e Jafar (2018). Além disso, seu desenvolvimento utiliza modelos de empacotamento que levam a uma alta durabilidade (Alkaysi *et al.*, 2015).

Na produção do compósito cimentício de ultra alto desempenho normalmente são utilizadas sílica ativa, além de elevados consumos de cimento (da ordem de 800 – 1000 kg/m³) (Bahedh e Jafar, 2018; Ganesh e Murthy, 2018) e agregados de menores dimensões, quando comparado a concretos convencionais. No entanto, devido ao alto impacto ambiental gerado na produção do cimento, já que são liberadas cerca de 0,8 toneladas de CO₂ para produzir uma tonelada de cimento (Mehta e Ashish, 2020), as matrizes cimentícias de ultra alto desempenho vão de encontro às atuais tendências de redução de pegada de carbono, com a utilização de teores elevados de materiais cimentícios suplementares em substituição parcial ao cimento. Os materiais cimentícios suplementares têm sido amplamente utilizados para substituir parcialmente o cimento Portland no concreto tanto como material de preenchimento quanto como material pozolânico.

Adaway e Wang (2015) utilizaram vidro residual como substituto parcial do agregado miúdo em concreto estrutural e verificaram que o concreto contendo até 30% de agregado de vidro fino exibe maior resistência à compressão do que o concreto convencional.

Du e Tan (2017) utilizaram alto volume de pó de vidro como substituto parcial do cimento no compósito cimentício e obtiveram melhores comportamentos mecânicos e maior desempenho com relação à durabilidade.

Estudos realizados por Afshinnia e Rangaraju (2015) apresentaram resultados satisfatórios na mitigação da reação álcali-sílica quando o pó de vidro foi utilizado como material pozolânico em substituição parcial ao cimento.

No que diz respeito ao ataque de cloretos, os concretos de alto e ultra alto desempenho, devido à sua microestrutura densa, devem resolver o problema de durabilidade em concreto convencional estrutural (Sohail *et al.*, 2021).

Em 2007, a União Europeia gerou cerca de 25,8 Mt de resíduo de vidro (Abdollahnejad *et al.*, 2017). Em 2008, o Brasil consumiu 5,5 kg/hab. de embalagens de vidro, dos quais 80% não foram reciclados de acordo com dados do Instituto de pesquisa econômica aplicada (IPEA) de 2012. Desta maneira, o resíduo de vidro se apresenta como um material abundante e cujo uso pode ajudar a reduzir o impacto ambiental, tanto no concreto como material cimentício suplementar, quanto na fabricação do cimento, como material pozolânico. Levando em conta seu alto teor de sílica (SiO₂), sua estrutura amorfa e suas características pozolânicas (Mehta e Ashish, 2020), o pó de vidro pode ser utilizado em substituição parcial ao cimento, visando reduzir as emissões de carbono da indústria da Construção Civil.

Assim o principal objetivo deste trabalho é avaliar a durabilidade dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD) com substituições parciais do cimento por pó de vidro, nos teores de 10%, 20%, 30% e 50%, com enfoque na penetração de cloretos, por meio do ensaio de migração de cloretos.

2. MATERIAIS E METODOS

2.1 Materiais

Para realização desta pesquisa foram utilizados como aglomerantes o cimento Portland CPV-ARI, a sílica ativa e o pó de vidro. Foi utilizado o pó de vidro com tamanho de partículas passantes nas peneiras de malha #200 (partículas menores que 75 µm). Foram empregados vidros classificados

como soda-cal, a partir de garrafas pós-consumo da cor âmbar, para minimizar variações não controladas devido aos corantes. Após coleta as garrafas de vidro foram lavadas em água com detergente para retirada de rótulos, tampas, cola e impurezas. Em seguida foram secas ao ar e trituradas em betoneira carregada com esferas de aço-cromo. Após trituração, o vidro foi moído em um moinho de bolas que possui revestimento de sílex, com as bolas utilizadas para o processo de moagem do mesmo material. O vidro resultante da moagem em moinho de bolas foi seco em estufa a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas. Depois de seco o vidro foi peneirado em peneirador mecânico, numa média de 15 minutos para cada 200 g de pó de vidro. Na Figura 1 observa-se o processo para processamento do pó de vidro.

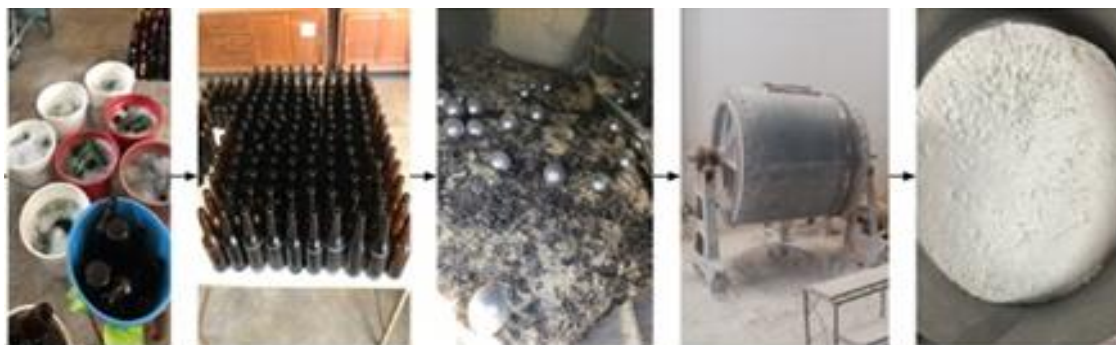


Figura 1. Preparo do pó de vidro reciclado.

Fonte: Adaptado de Freitas (2019).

Os materiais moídos foram acondicionados em sacos de papel e de plástico, evitando o contato com a umidade. Além disso, foi utilizado agregado miúdo natural de origem quartzosa com dimensão máxima de 1,2 mm. Foram utilizados também aditivos superplastificante a base de policarboxilato, para garantir baixa relação água/aglomerante e aditivo redutor de retração, para evitar a fissuração da matriz. As características físicas do cimento, sílica ativa, pó de vidro e areia são apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente. A quantidade de amostras ensaiadas foi de acordo com as normas brasileiras específicas para cada ensaio.

Tabela 1. Características físicas do cimento.

Parâmetro	Método	Valor obtido	Valor de referência NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,16 g/cm ³	-
Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	135 min	≥ 60 min
Fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	210 min	≤ 600 min
Água para pasta de consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018)	30,0%	-
% retida na peneira 75 µm	NBR 16372 (ABNT, 2015)	0,1%	≤ 6,0%
Superfície específica - Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2015)	665,0 m ² /kg	-

Resistência à compressão	1 dia	NBR 7215 (ABNT, 2019)	27,5 MPa	$\geq 14,0$ MPa
	3 dias		42,0 MPa	$\geq 20,0$ MPa
	7 dias		48,7 MPa	$\geq 34,0$ MPa
	28 dias		52,2 MPa	-

Tabela 2. Características físicas da sílica ativa, pó de vidro.

Parâmetro	Sílica ativa		Pó de vidro	
	Valor obtido	Valor de referência da NBR 13956-1	Valor obtido	Valor de referência
Massa específica	2,25 kg/dm ³	-	2,55 kg/dm ³	-
Umidade	Máx. 3,0%	$\leq 3,0\%$	-	-
% retida na peneira 45 μ m	Máx. 10,0%	$\leq 10,0\%$	-	-
Superfície específica - Blaine	247,0 m ² /kg	-	393,0 m ² /kg	-
Índice de atividade pozolânica	Mín. 105,0%	$\geq 105,0\%$	6,4 MPa \pm 0,10 *	6,0 MPa**

*ensaio realizado utilizando a metodologia da NBR 5751 (ABNT, 2015).

**valor de referência da NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3. Características físicas do agregado miúdo.

Parâmetro	Método	Valor obtido
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,64%
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,56 g/cm ³
Massa unitária seca e solta	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475,78 kg/m ³
Massa unitária compactada	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1617,83 kg/m ³
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2006)	Solução mais clara que a padrão
Material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,66%

Na Tabela 4 são apresentadas as características químicas do cimento, sílica ativa, pó de vidro e agregado miúdo utilizados.

Tabela 4. Características químicas dos materiais.

Componente	Materiais (valores em % de massa)			
	Cimento	Sílica Ativa	Pó de Vidro	Agregado miúdo
Perda ao fogo (PF)	4,05 ($\leq 6,50$)*	3,60 ($\leq 6,00$)**	0,58	0,58
Óxido de cálcio (CaO)	61,40	<0,20	9,10	0,071
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,31	<0,20	3,70	3,40
Anidrido silícico (SiO ₂)	23,00	94,10	74,00	94,00
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,97 ($\leq 4,5$)*	-	-	-
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,49	<0,50	0,42	0,67

Óxido de potássio (K ₂ O)	0,96	1,28	0,56	1,20
Óxido fosfórico (P ₂ O ₅)	0,52	-	-	-
Óxido de estrôncio (SrO)	0,27	<0,20	0,039	-
Íon Cloro (Cl ⁻)	0,12	-	-	-
Dióxido de tório (ThO ₂)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Uraninita (U ₃ O ₈)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Dióxido de titânio (TiO ₂)	-	<0,20	-	0,35
Óxido de Cromo (Cr ₂ O ₃)	-	-	-	0,049
Óxido de Magnésio (MgO)	-	-	0,74	-
Óxido de rubídio (Rb ₂ O)	-	-	0,016	-
Óxido de sódio (Na ₂ O)	-	-	11,00	0,37

* Valores de referência da NBR 16697 (ABNT, 2018).

** Valores de referência da NBR 13956-1 (ABNT, 2012).

Na Figura 2 está apresentada a distribuição granulométrica do cimento, sílica ativa, pó de vidro e agregado miúdo (areia quartzosa). Observa-se um D₅₀ de 0,8 µm para sílica ativa, de 7 µm para o cimento, de 15 µm para o pó de vidro e de 270 µm para a areia quartzosa. Foram utilizadas três amostras para cada material ensaiado.

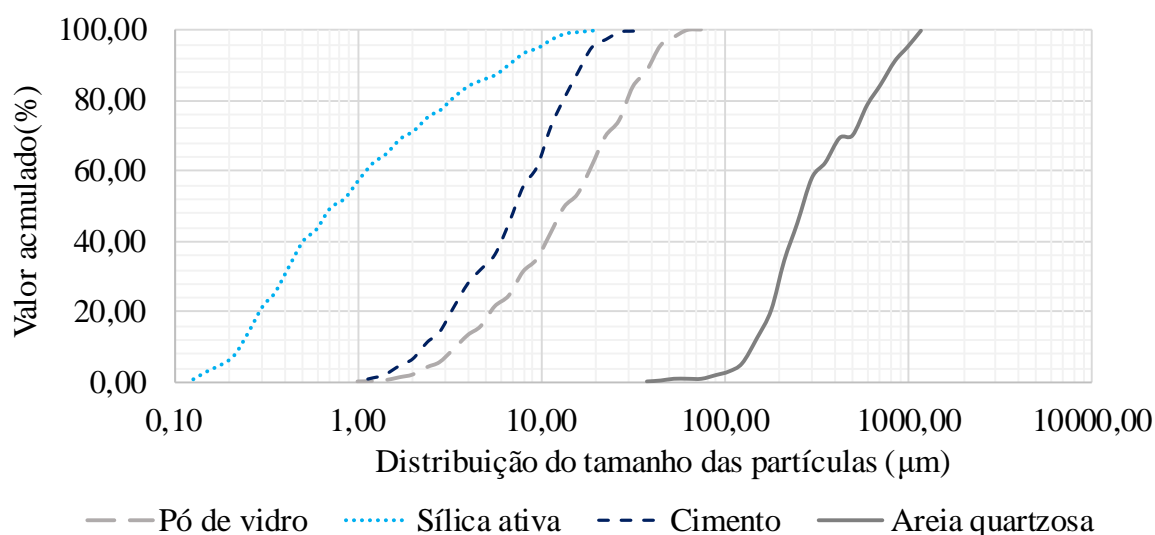


Figura 2. Distribuição granulométrica dos materiais.

2.2 Metodologia

Para a produção dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, adotou-se uma relação água/aglomerante de 0,18 em todos os traços, com a adição de 8% de sílica ativa em relação ao consumo de cimento do traço referência. O pó de vidro foi utilizado nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% em substituição volumétrica ao cimento, representados pela nomenclatura REF, VD10, VD20, VD30 e VD50, respectivamente. Além disso, foi utilizado um teor de 2,25% de aditivo superplastificante, para obtenção de um índice de consistência de 380±10mm (consistência fluida) e aditivo redutor de retração em teor de 1%, conforme recomendação do fabricante. A compatibilidade aglomerantes-aditivos foi avaliada pelo ensaio de miniabatimento, de acordo com o ensaio de Kantro (1980).

A consistência dos compósitos cimentícios (Figura 3) foi verificada de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016) e a densidade de massa e teor de ar incorporado de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005), no estado fresco.



Figura 3. Verificação do espalhamento para determinação da consistência dos compósitos cimentícios.

Na Tabela 5 são apresentados o traço unitário, o consumo de cimento e suas respectivas consistências para cada traço. A nomenclatura SP refere-se ao aditivo superplastificante e RR, ao aditivo redutor de retração.

Tabela 5. Traços unitários e índices de consistência de cada compósito estudado.

Traço	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água	SP	RR	Consistência (mm)
REF	1	0,08	0,00	1,07	0,194	0,020	0,010	380,0
VD10	1	0,09	0,09	1,19	0,216	0,027	0,012	377,0
VD20	1	0,10	0,20	1,34	0,243	0,030	0,014	375,5
VD30	1	0,11	0,35	1,53	0,278	0,035	0,015	381,5
VD50	1	0,16	0,81	2,15	0,389	0,049	0,022	384,5

Na Tabela 6 observam-se os consumos de materiais de cada mistura dos compósitos cimentícios avaliados.

Tabela 6. Consumo dos materiais constituintes dos compósitos cimentícios, em kg/m³.

Traço	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água*	SP	RR
REF	1000,00	80,00	0,00	1074,00	181,28	24,3	10,80
VD10	900,00	80,00	81,00	1074,00	181,28	24,3	10,80
VD20	800,00	80,00	161,00	1074,00	181,28	24,3	10,80
VD30	700,00	80,00	242,00	1074,00	181,28	24,3	10,80
VD50	500,00	80,00	403,00	1074,00	181,28	24,3	10,80

*Água corrigida pelo teor de resíduos sólidos do superplastificante

No estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos 5x10 cm, adensados manualmente e curados em água saturada com cal. O ensaio de resistência à compressão axial dos CCUAD foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), aos 28 dias com 4 corpos de prova por traço. O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade estático dos CCUAD foi

realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), na idade de 28 dias com três corpos de prova por traço.

Em relação aos ensaios de durabilidade, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade dos CCUAD na idade de 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012) em três corpos de prova de 5x10 cm por traço, de determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário (de acordo com a NT Build 492), sendo moldados dois corpos de prova 10x20 cm para cada traço.

A Figura 4 apresenta o aparato utilizado para a realização do ensaio de difusão de cloretos.



Figura 4. Aparato para realização do ensaio de difusão de cloretos.

Os corpos de prova foram cortados em quatro partes iguais de 10x5 cm, utilizando-se para o ensaio as duas amostras centrais. Após serem cortadas, as amostras passaram pelo processo de pré-condicionamento, em um recipiente à vácuo com as duas faces expostas a uma pressão interna entre 1 e 5 KPa. Posteriormente, o recipiente contendo as amostras foi preenchido com uma solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, até que as amostras ficassem totalmente imersas. O vácuo foi mantido no recipiente buscando garantir a saturação dos poros do compósito cimentício com a solução. Foram então preparadas duas soluções, uma de água com cloreto de sódio (NaCl) a 10%, que será o cátodo da reação e outra de água com hidróxido de sódio (NaOH) 0,3 M, que atua como ânodo. Após serem retirados do vácuo as amostras foram colocadas em tubos, e as interfaces vedadas com silicone, visando garantir que apenas as faces ficassem em contato com as soluções. Encheu-se um recipiente com a solução de NaCl e a solução de NaOH foi colocada nos tubos acima das amostras. Os tubos com as amostras foram então colocados no recipiente contendo a solução de NaCl . Ligou-se o polo positivo da fonte de energia ao ânodo e o negativo ao cátodo e fez-se passar corrente pelo sistema, visando acelerar a migração dos íons Cl^- , pelas amostras. O tempo de ensaio e a tensão são definidos com base na corrente inicial passante pelo sistema, de acordo com as recomendações de NT Build 492. As amostras foram então retiradas do equipamento, fraturadas por tração por compressão diametral, e feita a aspersão com solução 0,1M de nitrato de prata (AgNO_3), visando destacar qual foi a profundidade de penetração de cloretos nas amostras. Essa profundidade foi então medida com um paquímetro e determinou-se o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário através da Equação 1, na qual D_{nssm} representa o coeficiente de migração no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), U a tensão aplicada (V), T a média da temperatura inicial e final do ânodo ($^\circ\text{C}$), L a altura da amostra (mm), x_d a média das penetrações (mm), t a duração do teste (horas).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

Os resultados foram analisados utilizando a Análise de Variância (ANOVA), e para os casos em que $F > F_{\text{crítico}}$, utilizou-se o teste de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 7 estão indicados os valores de densidade de massa, teor de ar incorporado, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, aos 28 dias. Na tabela a letra *A* indica que o valor é estatisticamente igual a referência, enquanto a letra *B* indica diferença estatística com a referência

Tabela 7. Características mecânicas e físicas dos CCUAD estudados.

Traço	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)	Resistencia à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Absorção de água(g/cm ²)
REF	2307,0	4,0	115,58±12,77/-	43,09±1,81/-	0,079±0,008/-
VD10	2338,0	2,0	119,40±2,76/A	45,51±3,35/A	0,077±0,007/A
VD20	2326,0	2,0	113,57±6,84/A	41,67±3,54/A	0,092±0,007/A
VD30	2322,0	1,0	110,66±6,13/A	42,94±2,73/A	0,091±0,003/A
VD50	2273,0	1,0	83,37±6,83/B	41,51±0,80/A	0,088±0,02/A

Observa-se um aumento em torno de 1% na densidade de massa para as amostras VD10, VD20 e VD30 quando comparados com a amostra REF, enquanto a densidade do compósito com substituição de 50% de cimento Portland por pó de vidro diminuiu em 1,47%. Para o teor de ar incorporado, verifica-se uma redução com o aumento do teor de pó de vidro. Em relação a resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e absorção de água existe uma variação entre os valores, no entanto nenhuma amostra apresenta diferença estatística significativa da amostra de referência, com exceção da resistência à compressão do VD50 que diminuiu 23,5% em relação ao REF.

Li *et al.* (2019) e Lee *et al.* (2018) adicionaram pó de vidro à pasta de cimento, com os teores variando de 0% a 25% e $a/c=0,41$ e a resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de pó de vidro. A diminuição da resistência à compressão da pasta de cimento com pó de vidro pode ser explicada pelo efeito de diluição. O efeito de diluição do pó de vidro reduz o teor de cimento e aumenta a relação água/cimento efetiva, de modo a diminuir a formação de produtos de hidratação e, finalmente, reduzir a resistência à compressão da pasta de cimento (Du *et al.*, 2020). Isso também é observado em outros estudos. De acordo com Du e Tan (2017), em comparação com a hidratação do cimento, a reação pozolânica do pó de vidro é relativamente mais lenta e, portanto, a resistência nas primeiras idades do concreto é reduzida. No entanto, com uma idade de cura mais longa, os benefícios da reação pozolânica do pó de vidro começam a aparecer. Sohail *et al.* (2018) colocaram em um gráfico várias pesquisas relacionando resistência à compressão com a relação água/aglomerante. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos cimentícios de referência e com substituição de cimento Portland por pó de vidro encontrados na presente pesquisa foram incorporados ao mesmo gráfico (Figura 5).

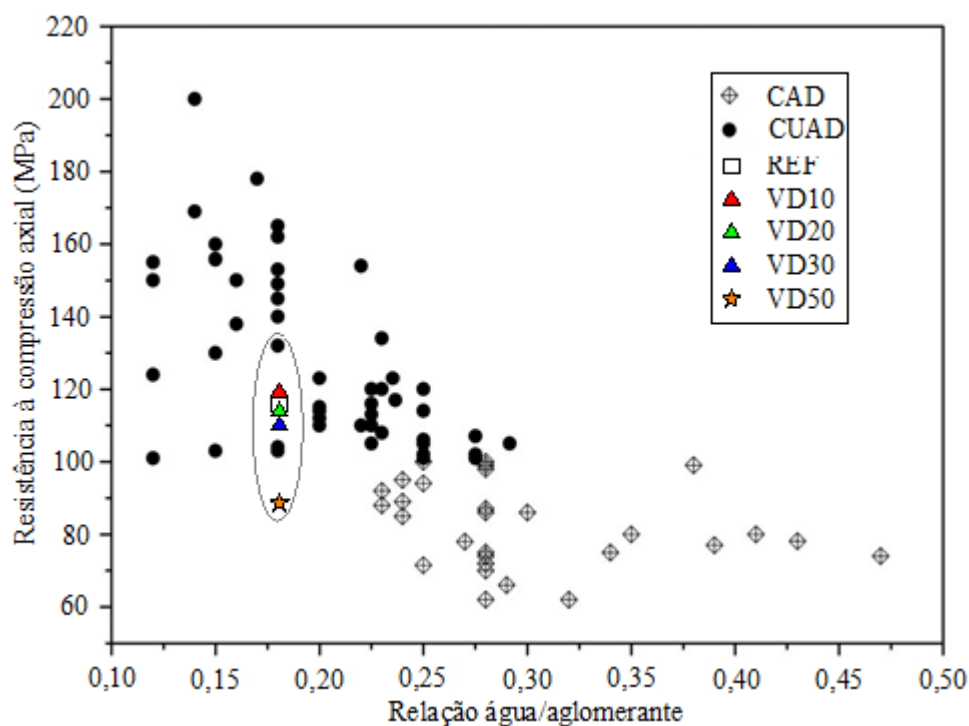


Figura 5. Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão de CAD e CUAD aos 28 dias.

Fonte: Adaptado de Sohail et al. (2018).

Ao reduzir a relação água/aglomerante, a resistência à compressão aumenta; no entanto, para misturas de CCUAD na mesma relação água/aglomerante, diferentes resistências à compressão foram alcançadas devido a outros fatores, como a quantidade e o tipo de cimento ou sílica ativa. Na Tabela 8 estão apresentados os valores da frente de penetração de cloretos e os coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário.

Tabela 8. Frente de penetração de cloretos e coeficientes de difusão de cloretos aos 28 dias.

Traço	Frente de penetração de cloretos (mm)		Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (10^{-12} m ² /s)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
REF	1,17	1,26	0,196	0,019
VD10	1,14	0,93	0,191	0,026
VD20	1,55	0,88	0,141	0,018
VD30	1,46	0,91	0,261	0,059
VD50	1,63	0,67	0,340	0,021

Na Figura 6 são apresentados graficamente os valores do coeficiente de difusão de cloretos em 10^{-12} m²/s, bem como a profundidade média de penetração. Ressalta-se que as amostras marcadas com a letra A são as estatisticamente iguais à amostra de referência, enquanto as marcadas com a letra B são estatisticamente diferentes da amostra de referência.

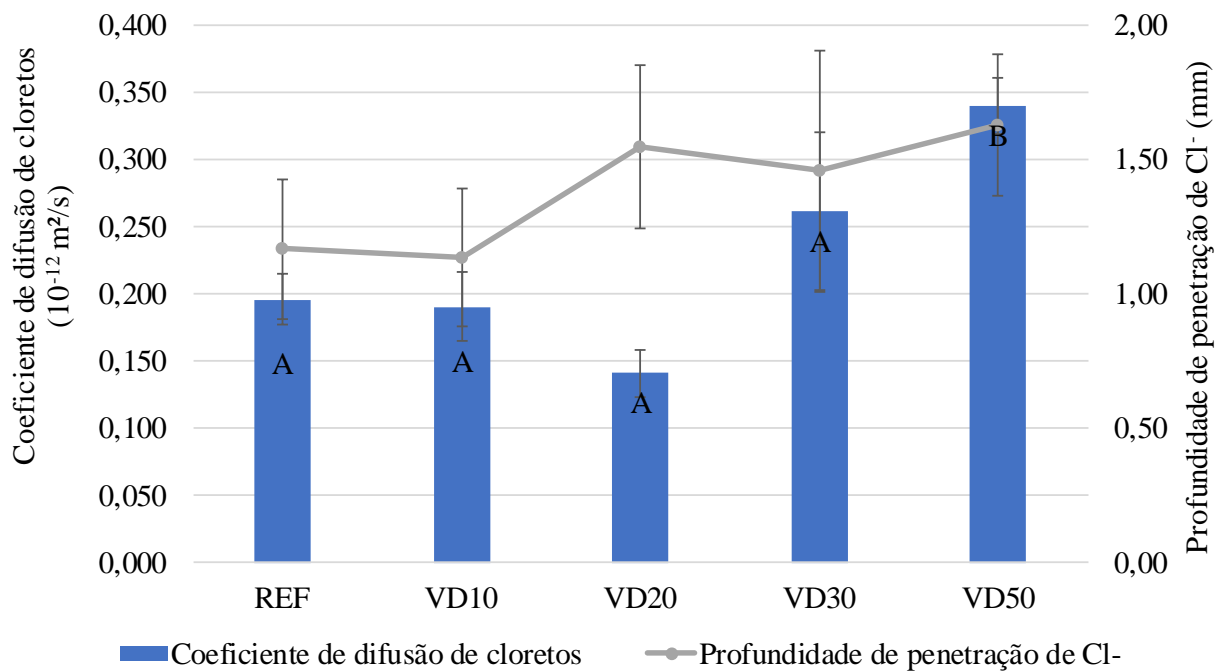


Figura 6. Coeficiente de difusão de cloretos e profundidade de penetração.

Observa-se que houve um aumento do coeficiente de migração dos compósitos cimentícios com o aumento do teor de pó de vidro incorporado (exceto para o traço VD20). Tal fato pode ser explicado devido às partículas de pó de vidro ($D_{50}=15\mu\text{m}$) serem maiores que as de cimento ($D_{50}=7\mu\text{m}$), levando a um diferente empacotamento das partículas (efeito fíler do pó de vidro), além das reações pozolânicas do pó de vidro serem mais lentas que as reações de hidratação do cimento, se desenvolvendo até idades mais avançadas, conforme observado por Du e Tan (2015). Desta maneira as amostras com maior teor de vidro tendem a ter um menor teor de C-S-H em idades intermediárias quando comparadas com as de menor teor ou sem pó de vidro. Tam *et al.* (2012) verificaram que um maior teor de C-S-H leva a uma menor quantidade de poros e a desconexão destes, sendo assim amostras com menor teor de C-S-H tenderão a ter uma frente de penetração de cloretos maior.

Ainda outro indicativo do crescimento da porosidade com o aumento do teor de pó de vidro é o fato de o teor de absorção de água tender a aumentar, conforme aumenta-se a porcentagem de pó de vidro, conforme apresentado na Tabela 7.

A profundidade de penetração de cloretos aos 28 dias acompanhou o coeficiente de difusão de cloretos para todos os traços com exceção do traço com 20% de substituição.

Para o coeficiente de difusão de cloretos, a análise estatística mostra que a substituição de cimento por 50% de pó de vidro exerceu um efeito significativo quando comparado com todos os traços avaliados.

No entanto, cabe ressaltar que para todas as amostras todos os valores obtidos foram inferiores aos observados em outras pesquisas com materiais de ultra alto desempenho. Chen *et al.* (2018) e Mosavinejad *et al.* (2020) avaliaram o coeficiente de difusão de cloretos em CCUAD obtendo profundidades de penetração da ordem de 5 mm e coeficientes de difusão de $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Além disso, ao se comparar os valores obtidos na pesquisa com os da Tabela 9, verifica-se que todos os traços são classificados com resistência extremamente alta à penetração de cloretos.

Tabela 9. Resistência a penetração de cloretos de vários tipos de concreto baseada no coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias.

Coeficiente de difusão de cloretos ($10^{-12}m^2/s$)	Classificação de resistência a penetração de cloretos
>15	Baixa
10,0-15,0	Moderada
5,0-10,0	Alta
2,5-5,0	Muito alta
<2,5	Extremamente alta

Fonte: Adaptado de Teng *et al.* (2018).

Castellote, Andrade e Alonso (2001) e Santos (2006) analisaram os ensaios de difusão de cloretos em concretos comuns com e sem incorporação de sílica ativa e variando a relação água/cimento e justificaram a redução dos coeficientes de difusão devido a uma redução na relação água/aglomerante acompanhada de uma redução na porosidade total em função da diminuição dessa relação. No presente trabalho a relação água/aglomerante foi mantida constante o que proporcionou um aumento significativo da relação água/cimento do VD50, podendo ter provocado o aumento de sua porosidade.

De acordo com Li *et al.* (2020), os coeficientes de difusão de íons cloreto de CCUAD variam de $0,02 \times 10^{-12} m^2/s$ a $0,41 \times 10^{-12} m^2/s$ dependendo da relação água/cimento, regime de cura, volume de fibras e idade dos testes. Devido ao grande número de parâmetros envolvidos nos testes realizados, disponíveis na literatura, é difícil fazer uma comparação quantitativa da difusão dos íons cloreto nos CCUAD.

4. CONCLUSÕES

Diante dos dados obtidos, conclui-se que:

1. considerando que todos os traços estudados alcançaram alta resistência à compressão, com alto módulo de elasticidade, baixa absorção de água e elevada resistência à penetração e difusão de cloretos, todos são compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, com ou sem a incorporação de pó de vidro;
2. a substituição parcial de grandes teores de cimento por pó de vidro (50%) pode ocasionar alterações nas características do compósito cimentício na idade de 28 dias;
3. apesar de haver uma redução, os coeficientes obtidos ainda são muito inferiores aos da literatura, indicando alta resistência mecânica e resistência extremamente alta à penetração de cloretos. Sendo assim, o pó de vidro se apresenta como substituto viável para o cimento em termos de durabilidade frente à penetração de cloretos;
4. considerando-se a redução expressiva na quantidade de cimento no compósito cimentício com a substituição de 50% do cimento por pó de vidro, e em função das características apresentadas pelo material, recomenda-se a sua utilização, em comparação com os outros compósitos estudados. É a alternativa mais econômica e que proporciona menor impacto ambiental.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro na realização desta pesquisa e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pelo auxílio nos ensaios de caracterização dos aglomerantes.

6. REFERÊNCIAS

- Abdollahnejad, Z., Kheradmand, M., Pacheco-Torgal, F. (2017), *Short-Term Compressive Strength of Fly Ash and Waste Glass Alkali-Activated Cement-Based Binder Mortars with Two Biopolymers*. Journal of Materials in Civil Engineering. 29(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001920)
- Adaway, M., Wang, Y. (2015), *Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength*. Electronic Journal of Structural Engineering. 14(1):116-122.
- Afshinnia, K., Rangaraju, P. R. (2015), *Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars*. Construction and Building Materials. 81: 257-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Alkaysi, M., El-Tawil, S., Liu, Z., Hansen, W. (2016), *Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC)*. Cement and Concrete Composites. 66: 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2000). *NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). *NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). *NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e da massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5751 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 7681-2: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação a compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 9779: Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº200)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Bahedh, M. A., Jaafar, M. S. (2018), *Ultra High-Performance Concrete Utilizing Fly Ash as Cement Replacement under Autoclaving Technique*. Case Studies in Construction Materials. 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00202>
- Castellote, M., Andrade, C., Alonso, C. (2001), *Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests*. Cement and Concrete Research. 31(10): 1411-1420 [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00562-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00562-2)
- Chen, Y., Yu, R., Wang, X., Chen, J., Shui, Z. (2018), *Evaluation and optimization of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of Layered Double Hydroxides (LDHs)*. Construction and Building Materials. 177: 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.210>
- de Larrard, F., Sedran, T. (1994), *Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model*. Cement and Concrete Research. 24(6):997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- Du, H., Tan, K. H. (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials. 66: 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.092>
- Du, H., Tan, K. H. (2017), *Properties of high volume glass powder concrete*. Cement and Concrete Composites. 75: 22-29.
- Du, Y., Yang, W., Ge, Y., Wang, S., Liu, O. (2020), *Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material*. Journal of Cleaner Production. 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125018>
- Freitas, T. O. (2019), *“Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho”*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, p.148.
- Instituto de pesquisa econômica aplicada (IPEA) (2012), *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 27 de março de 2020.

- Kantro, D. (1980), *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test*. Cement, Concrete and Aggregates. 2(0):95-102. <https://doi.org/10.1520/CCA10190J>
- Lee, H., Hanif, A., Usman, M., Sim., J., Oh, H. (2018), *Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material*. Journal of Cleaner Production. 170: 683-693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.133>
- Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., Zhang, Z. (2020), *Durability of ultra-high performance concrete: a review*. Construction and Building Materials. 255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- Li, P. P., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H., Chen, W. (2019), *Conceptual design and performance evaluation of two-stage ultra-low binder ultra-high performance concrete*. Cement and Concrete Research.125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019>
- Mehta, A., Ashish, D. K. (2020), *Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>
- Mosavinejad, S. H. G., Langaroudi, M. A. M., Barandoust, J., Ghanizadeh, A. (2020), *Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers*. Construction and Building Materials. 235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117448>
- Nordtest Method (1999). *NT BUILD 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*
- Santos, L. (2006), *“Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto”*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, p.178
- Sohail, M. G., Kahraman, R., Nuaimi, N.A., Gencturk, B., Alnahhal, W. (2021), *Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes*. Journal of Building Engineering. 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101669>
- Sohail, M. G., Wang, B., Jain, A., Kahraman, R. (2018), *Advancements in concrete mix designs: high-performance and ultrahigh-performance concretes from 1970 to 2016*. Journal of Materials in Civil Engineering.30(3). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002144](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002144)
- Tam, C. M., Tam, V. W. Y., Ng, K. M. (2012), *Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong*. Construction and Building Materials. 26:79-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>
- Teng, S, Afroughsabet, V., Ostertag, C. P. (2018). *Flexural behavior and durability properties of high-performance hybrid-fiber-reinforced concrete*. Construction and Building Materials. 182:504-515. <https://doi.org/10.1016/j.conmat.2018.06.158>
- Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Xiao, X., Zhang, Z., Wang, Y., He, Y. (2019), *Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag*. Journal of Cleaner Production. 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118157>

Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado

C. Vieira Pontes^{1,2}, G. Costa Reus^{1*}, A. Calvo^{1,2}, M. H. F. Medeiros^{1,2,3}

* Autor de Contato: giovanacostareus@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.480>

Recepção: 16/04/2020 | Aceitação: 12/02/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal propor um procedimento padrão para a utilização do método colorimétrico para medir a profundidade de penetração de cloretos nas inspeções de estruturas de concreto em que existe a exposição aos cloretos e à carbonatação simultaneamente. Para evitar a ocorrência de resultados "falsos positivos" foram testadas as soluções de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e hidróxido de sódio (NaOH) como tratamento prévio. Os testes foram conduzidos em amostras apenas carbonatadas e em amostras contaminadas por cloretos e carbonatadas. Os resultados mostram que a solução de NaOH elimina a interferência da carbonatação. Desse modo, chegou-se a indicação de um método adequado para introdução de leituras de profundidade de contaminação por cloretos nas inspeções do concreto em campo.

Palavras-chave: durabilidade do concreto; ataque por cloretos; nitrato de prata; carbonatação; agressividade ambiental.

Citar como: Vieira Pontes, C., Costa Reus, G., Calvo, A., Medeiros, M. H. F. (2021), "Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. x-x., DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.480>

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC)

² Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil

³ Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC)

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora principal é Réus G. C., contribuiu com a revisão bibliográfica, com o planejamento do programa experimental, execução dos ensaios previstos, consequente coleta de dados, análise dos resultados e posterior redação do trabalho em questão. No que lhe concerne à autora Pontes, C. V., a mesma contribuiu na execução dos ensaios de laboratório e coleta de dados. O autor Medeiros, M. H.F. contribuiu com a ideia original em conjunto com a autora principal, se envolveu na redação do trabalho e na análise e discussão dos resultados obtidos na etapa experimental. Finalmente, a autora Calvo, A. participou da revisão e correção do manuscrito, confeccionou imagens que aparecem no texto e fez a tradução do trabalho para o Espanhol. Dessa forma, a contribuição em porcentagem de cada um dos autores foi: 40%, 25%, 25% e 10%, na ordem que foram mencionados anteriormente.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Procedure to detect the penetration of chlorides into carbonated concrete with silver nitrate

ABSTRACT

The main objective of this work is to propose a standard procedure that enables the use of the colorimetric method to measure the depth of chloride penetration during inspections of concrete structures exposed to both chlorides and carbonation. To avoid the occurrence of false positive results, solutions of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and sodium hydroxide (NaOH) were tested as a pretreatment. The tests were carried out on carbonated only samples, and on carbonate and chloride contaminated samples. The results show that the NaOH solution eliminates the carbonation interference. Therefore, a suitable method was found to introduce depth readings of chloride contamination in concrete field inspections.

Keywords: durability of concrete; chloride attack; silver nitrate; carbonation; environmental aggressiveness.

Procedimiento para detectar la penetración de cloruros con nitrato de plata en hormigón carbonatado

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal proponer un procedimiento estándar que viabilice el uso del método colorimétrico para medir la profundidad de penetración de cloruros durante las inspecciones de estructuras de hormigón expuestas tanto a cloruros como a carbonatación. Para evitar la aparición de resultados "falsos positivos", se probaron soluciones de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e hidróxido de sodio (NaOH) como pretratamiento. Las pruebas se llevaron a cabo en muestras solamente carbonatadas, y en muestras contaminadas por cloruros y carbonatadas. Los resultados muestran que la solución de NaOH elimina la interferencia de la carbonatación. Por lo tanto, se llegó a un método adecuado para introducir lecturas de profundidad de contaminación por cloruro en inspecciones de estructuras de hormigón en campo.

Palabras clave: durabilidad del hormigón; ataque por cloruros; nitrato de plata; carbonatación; agresividad ambiental.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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 do aço é um dos mecanismos de degradação mais comuns nas estruturas de concreto armado, tendo como causas principais a carbonatação e o ataque por íons cloreto (Corral et al., 2013). Ambos os fenômenos são responsáveis por desfazerem a fina camada de óxido de ferro, camada passivadora, que cobre e protege as barras de aço contra a corrosão em ambientes com pH acima de 11 (Helene, 1993; Montemor et al., 2003; Moreira, 2006; França, 2011).

O ingresso de íons cloreto no concreto ocorre em diferentes velocidades em uma mesma edificação, à depender dos microclimas distintos que ocorram sobre ela, como citado por Medeiros et al. (2013), Medeiros Junior et al. (2015a) e Medeiros Junior et al. (2015b). Como relatado por diferentes autores (Helene, 1993; Montemor et al., 2003; Medeiros et al., 2009a; França, 2011; Real et al., 2015), a presença de íons cloretos no concreto armado deve-se à difusão destes elementos iônicos do meio externo para o interior da estrutura, ou à utilização de matérias primas contaminadas para a produção do concreto.

O ataque por cloretos no aço gera uma reação expansiva, isto é, os íons cloreto reagem com os íons de ferro da armadura e formam produtos (óxidos e hidróxidos de ferro) que possuem volumes maiores que os íons de ferro originais. Este fenômeno gera tensões internas que, se ultrapassarem a resistência à tração do concreto, podem ocasionar fissuras na estrutura (Cascardo, 1997; Montemor et al., 2003). Além disso, os íons cloreto corroem a armadura pontualmente (em forma de pites), reduzindo a seção transversal do elemento portante e afetando sua função estrutural (França, 2011).

Dentro deste contexto, a penetração de cloretos nas estruturas de concreto é uma possível causa de corrosão de armaduras, sendo importante para trabalhos de inspeção e diagnóstico do concreto armado o conhecimento da profundidade de penetração deste íon agressivo.

2. RELEVÂNCIA DO TEMA

Para inspecionar ou monitorar estruturas de concreto a fim de detectar a presença, a profundidade e/ou a evolução da penetração de íons cloreto, existe o método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata (AgNO_3) (Baroghel-Bouny et al., 2007; Real et al., 2015). A aspersão do indicador químico de solução de nitrato de prata é um método colorimétrico visual de inspeção e foi originalmente normatizado pela UNI 7928, em 1978. Trata-se de uma técnica qualitativa de aplicação prática em amostras de estruturas de concreto, além de apresentar baixo custo se comparado com a extração de pó de concreto e a determinação do perfil de cloretos em procedimentos de titulação ou potenciometria (França, 2011; He et al., 2012).

De acordo com Baroghel-Bouny et al. (2007), Medeiros et al. (2009b) e Kim et al. (2013), a técnica consiste na aspersão de solução de nitrato de prata na seção transversal recém fraturada de testemunhos de concreto para formação de duas regiões distintas quanto à coloração: uma com precipitado marrom correspondente à região sem cloretos, e outra sem coloração na região afetada por cloretos. A Figura 1 mostra o método colorimétrico de aspersão de solução de AgNO_3 sendo aplicado em um corpo de prova de concreto.

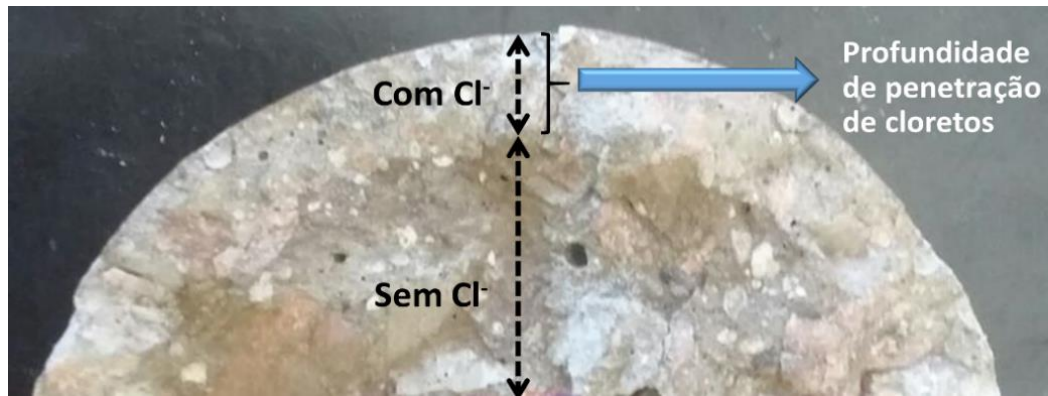


Figura 1. Medida da profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico visual por aspersão de solução aquosa de AgNO_3 0,1 M.

As reações fotoquímicas após aspersão da solução de nitrato de prata correspondem à combinação de íons de prata e íons cloreto livres formando cloreto de prata (AgCl), que possui coloração esbranquiçada, conforme a Equação (1). Nas regiões com ausência de cloretos livres, há reação fotoquímica entre íons de prata e íons hidroxila formando AgOH , e posteriormente Ag_2O , que confere ao concreto coloração marrom (Yuan et al., 2008; França, 2011; He et al., 2012; Kim et al., 2013; Real et al., 2015).



O método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata é muito usado em trabalhos experimentais em que o concreto testado se encontra em condições de saturação e livres do processo de carbonatação. Muitos trabalhos publicados nos últimos anos em revistas de alto impacto (tais como: Ferreira et al., 2016; Weiss et al., 2017; Wei et al., 2018; He et al., 2018; Slomka-Slupik et al., 2018; Fernández-Ruiz et al., 2018; Lau et al., 2018; Azarijafari et al., 2018), confirmam o seu uso frequente nas pesquisas atuais.

Porém, alguns estudos (França, 2011; Real et al., 2015) apontam que os íons de prata (Ag^+) da solução de nitrato de prata reagem com o produto da carbonatação, CO_3 , formando Ag_2CO_3 , que também confere coloração esbranquiçada ao concreto. Por isso, existe interferência da carbonatação no método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata em materiais cimentícios gerando possível resultado “falso positivo”, como relatado por Medeiros et al. (2018). Desse modo, ao inspecionar estruturas carbonatadas com o método colorimétrico de solução de nitrato de prata ocorre o indicativo da presença de íons cloretos em regiões que não necessariamente possuem cloretos e sim, carbonatos com pH menor que 10. Por este motivo, o resultado “falso positivo” pode inviabilizar a aplicação do método colorimétrico de solução de nitrato de prata em estruturas cimentícias expostas ao ambiente, já que a carbonatação é um mecanismo de degradação inerente às construções expostas ao meio.

Além disso, devido à ocorrência de grandes densidades demográficas brasileiras em áreas litorâneas associadas a processos de industrialização, verifica-se que os fenômenos de ataque por íons cloreto e carbonatação ocorrem simultaneamente em inúmeras estruturas de concreto armado (Real et al., 2015; Medeiros et al., 2013).

Dentro deste contexto, existe uma limitação ao uso da aspersão de solução de nitrato de prata para detecção da frente de penetração de cloretos em obras reais, em que existe a exposição a ambientes com cloretos e o processo de carbonatação, ambos interagindo com o concreto em condições de serviço e de forma simultânea. O objetivo desta pesquisa é, portanto, desenvolver um procedimento padrão para detectar a profundidade de penetração de cloretos no concreto carbonatado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os corpos de prova cilíndricos de concreto empregados em ambas as fases da pesquisa foram dosados com cimento do tipo CPV – ARI, com as dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada caso do estudo foram realizadas três repetições, ou seja, 3 corpos de prova nas mesmas condições para cada medida, e foi calculada a média dos resultados.

A Tabela 1 mostra a composição química do cimento e do fíler de quartzo empregados no proporcionamento dos materiais na dosagem do concreto. Além disso, as características físicas do cimento e do fíler de quartzo estão representadas na Tabela 2.

Tabela 1. Análise química, por fluorescência de raios X, do cimento CP V-ARI e do fíler de quartzo.

Aglomerante	Análise Química (%)							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
CP V - ARI	73,21	10,45	3,59	3,71	3,66	3,05	1,36	0,00
Fíler Quartzoso	0,00	95,65	2,43	0,00	0,00	1,77	0,00	0,04

Tabela 2. Características físicas do cimento CP V-ARI e do fíler de quartzo.

Aglomerante	Massa específica (g/cm ³)	Área específica BET (m ² /kg)
CPV-ARI	3,09	1,070
Fíler quartzoso	2,60	1,227

Como agregado miúdo utilizou-se areia natural quartzosa proveniente de Balsa Nova - Brasil, que tem massa específica de 2,63 g/cm³, massa unitária de 1,54 g/cm³ e módulo de finura de 2,34. O agregado graúdo foi basalto com dimensão máxima de 19 mm e massa específica de 2,64 g/cm³. A proporção de mistura do concreto utilizado foi de 1 : 0,10 : 2,25 : 3,00 (cimento : fíler de quartzo : agregado miúdo : agregado graúdo) com relação água/cimento de 0,50. O slump foi mantido constante na faixa de 10 ± 2 cm. Este concreto apresentou resistência à compressão de 43 MPa e sorvidade de água foi 0,0059 g/cm².horas^{0,5}.

Antes de iniciar a carbonatação acelerada, foi adotado um processo de sazonalização que consistiu no método NORIE, apresentado em Pauletti (2004). O processo consiste em dispor os corpos de prova em uma sala climatizada com umidade e temperatura controladas e, quando a variação do peso do corpo de prova for menor que 0,10 g em 24 horas, a amostra está apta para o ensaio de carbonatação acelerada.

As amostras foram sujeitas à carbonatação acelerada durante 12 semanas em câmara de carbonatação com teor de CO₂ de 5 ± 0,5%. A umidade relativa no interior do equipamento foi estabelecida em 60 ± 1 % e a temperatura à 40 ± 0,3°C. O coeficiente de carbonatação do concreto de substrato foi de 1,96 mm/semana^{0,5}. Estes dados estão em concordância com o publicado por Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017).

3.2 Métodos

Concreto carbonatado – Sem cloretos:

Inicialmente analisou-se a validade das soluções de hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio no aumento do pH da superfície do concreto e subsequente extinção do resultado “falso positivo” causado pela carbonatação no método de aspersão de solução de AgNO₃.

Para isso, foram utilizados corpos de prova carbonatados e sem cloretos. Cada um dos corpos de

prova foi seccionado, longitudinalmente, em quatro fatias de mesma altura para aspersão das soluções de NaOH e Ca(OH)₂. Em duas fatias do corpo de prova aspergiu-se solução aquosa saturada de hidróxido de sódio (150,00 g/L), e nas outras duas seções, aspergiu-se a solução aquosa saturada de hidróxido de cálcio (1,85 g/L), objetivando testar a eficácia das soluções. A fim de se obter secagem rápida das fatias, elas foram levadas à câmara seca com 55 ± 5% de umidade relativa e temperatura à 23 ± 2°C por cerca de uma hora.

Após este procedimento, em uma metade da seção transversal de cada um quarto de amostra seccionada, aplicou-se solução de fenolftaleína na proporção de 5 g de fenolftaleína para 276,15 g de álcool etílico para 150 g de água destilada. Na outra metade aspergiu-se, duas vezes sucessivamente, solução de nitrato de prata na concentração de 0,10 mol/L. A aplicação de nitrato de prata foi repetida para aumentar o contraste de cores entre as áreas com e sem cloretos, assim como foi executado no trabalho de Baroghel-Bouny et al. (2007).

Realizou-se, então, avaliação visual nas amostras. Se a fração com indicador químico de fenolftaleína adquirisse coloração vermelha carmim em toda sua extensão, a solução alcalina teria sido eficaz para aumentar o pH da frente de carbonatação e evitar o “falso positivo”. Ao mesmo tempo, a metade com solução de AgNO₃ deveria mudar, em toda sua extensão, para a coloração marrom, ou seja, não deveria apontar o resultado “falso positivo” de presença de íons cloreto, pois os corpos de prova estavam apenas carbonatados, sem cloretos. A Figura 2 mostra o esquema do experimento idealizado.

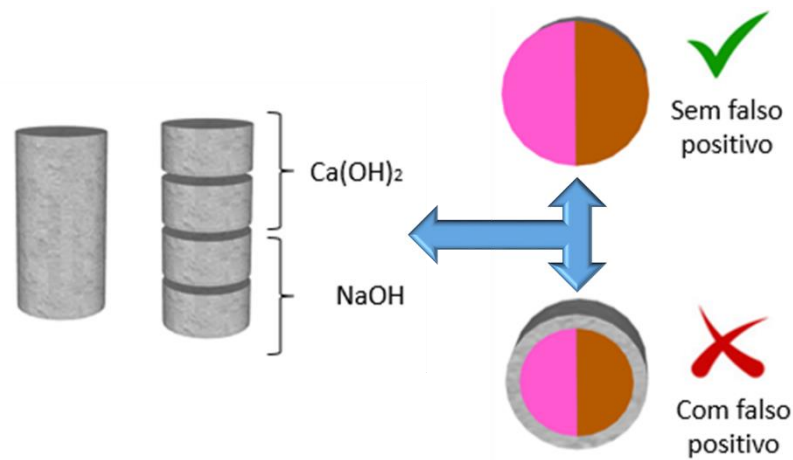


Figura 2. Esquema do experimento para eliminação do resultado “falso positivo” causado pela carbonatação.

Concreto carbonatado – Com cloretos:

Em seguida, o experimento foi conduzido no sentido de medir, com solução aquosa de nitrato de prata, a profundidade de penetração de cloretos em corpos de provas afetados por carbonatação e ataque por cloretos, simultaneamente. Foi aplicada, previamente, a solução alcalina inibidora dos efeitos da carbonatação na superfície do concreto. Para isso, foram utilizados três corpos de prova para cada tempo de penetração acelerada de cloretos (24h, 48h e 72h), totalizando 9 corpos de prova.

Para induzir a entrada de cloretos nas amostras de forma rápida, elaborou-se um sistema baseado na migração de cloretos. A migração dos íons é causada pela diferença de potencial elétrico entre os meios. Os íons positivos se movem em direção ao polo negativo e os íons negativos se movem em direção ao polo positivo. De acordo com Medeiros (2008), essa movimentação ocorre tanto por meio de migração quanto por difusão, porém, a migração é mais considerável nestas condições de ensaio.

Para o ensaio deste experimento, todos os corpos de prova foram saturados e, depois, imersos em

solução aquosa com 3% de NaCl, uma vez que a migração ocorre em meio saturado. Depois, conectou-se uma barra de aço e uma tela metálica à uma fonte elétrica de 30 V induzindo o polo positivo no orifício no interior da amostra. Desta forma, os ânions Cl^- , desassociados na solução de cloreto de sódio, foram eletrostaticamente atraídos para dentro dos corpos de prova. A Figura 3 mostra um esquema do aparato montado para a indução da penetração de cloretos nos corpos de prova de concreto.

Após o período de imersão/migração de cloretos, os elementos de concreto foram secos em estufa à 40°C por 24 horas, esfriados por mais um dia e, então, rompidos para aspersão das soluções alcalinas. A solução alcalina foi aplicada para elevar o pH da frente de carbonatação na superfície recém fraturada e evitar a ocorrência do resultado “falso positivo”. Após a aspersão desta solução, os corpos de prova testados permaneceram em câmara seca ($55\pm 5\%$ e $23\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura) durante 01 hora para eliminar o excesso de umidade na superfície do concreto.

Posteriormente, aplicou-se as soluções de fenolftaleína (para confirmar que a solução alcalinizou a superfície) e de nitrato de prata para tentar mensurar a profundidade de penetração de cloretos. Com a distinção das regiões esbranquiçada e marrom na metade com nitrato de prata, foi possível medir a profundidade de penetração de cloretos a partir da superfície do elemento. As medidas foram realizadas com paquímetro e em cinco pontos diferentes da metade da seção transversal, como esquematizado na Figura 4.



Figura 3. Esquema de ensaio de migração de cloretos: (a) esquema da ligação elétrica; (b) foto do experimento montado.

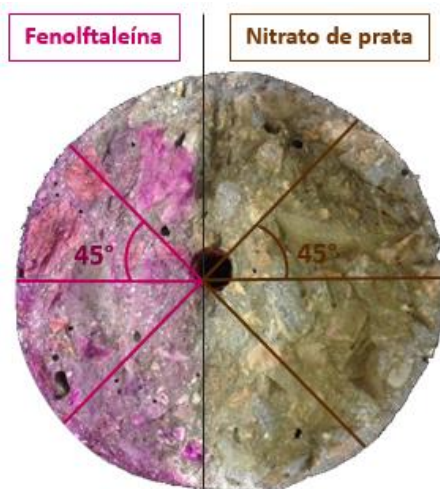


Figura 4. Esquema dos locais de medida da profundidade de carbonatação e da penetração de íons cloreto.

Para confirmar a profundidade de penetração de cloretos com o teste colorimétrico, foi determinado o perfil de cloretos usando o procedimento de coleta de amostra da RILEM TC 178-TMC publicado por Vennesland, Climent, Andrade (2013). Desse modo, após o processo de migração de cloretos, os corpos de prova foram secos em uma estufa a 40 °C durante 24 horas e resfriados ao ar durante mais 24 horas. Depois disso, o terço médio dos corpos de prova cilíndricos de Ø10 x 20 cm foi usado para a coleta de pó com uma furadeira. A coleta de amostras foi realizada a cada 10 mm de profundidade, até 40 mm de profundidade. Para cada profundidade de coleta de pó, foi efetivada a determinação do teor de cloretos solúveis em ácido (cloretos totais) por titulação com nitrato de prata após um ataque com ácido nítrico, como procedimento detalhado na ASTM C1152 (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concreto carbonatado – Sem cloretos:

A Figura 5 apresenta o resultado da tentativa de neutralizar o efeito da carbonatação no teste com o nitrato de prata utilizando a aspersão de uma solução aquosa saturada com hidróxido de cálcio e uma com hidróxido de sódio. Todas as amostras estavam carbonatadas e sem contaminação por cloretos.

Observa-se que a aspersão de solução saturada de hidróxido de cálcio não elevou o pH da camada de concreto carbonatada a ponto de atingir o ponto de viragem da solução indicadora química de fenolftaleína. É provável que isso tenha ocorrido em função da baixa concentração de hidroxila na solução saturada como hidróxido de cálcio. Isso ocorre devido à baixa solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, conforme relatado por Réus (2017).

Por outro lado, a solução de hidróxido de sódio elevou a basicidade do concreto, o que foi verificado na análise visual após aspersão do indicador químico de pH e da solução de AgNO_3 , resultado semelhante ao encontrado por Pontes *et al.* (2020). A solução de NaOH também foi eficaz para realcalinizar amostras de concreto no trabalho de Réus (2017) e Réus e Medeiros (2020).

Desse modo, pode-se dizer que a aspersão de solução saturada com hidróxido de sódio foi eficaz em eliminar a ocorrência de “falso positivo” quando se faz a aspersão de solução aquosa de nitrato de prata em concretos carbonatados, porém, sem contaminação por cloretos.

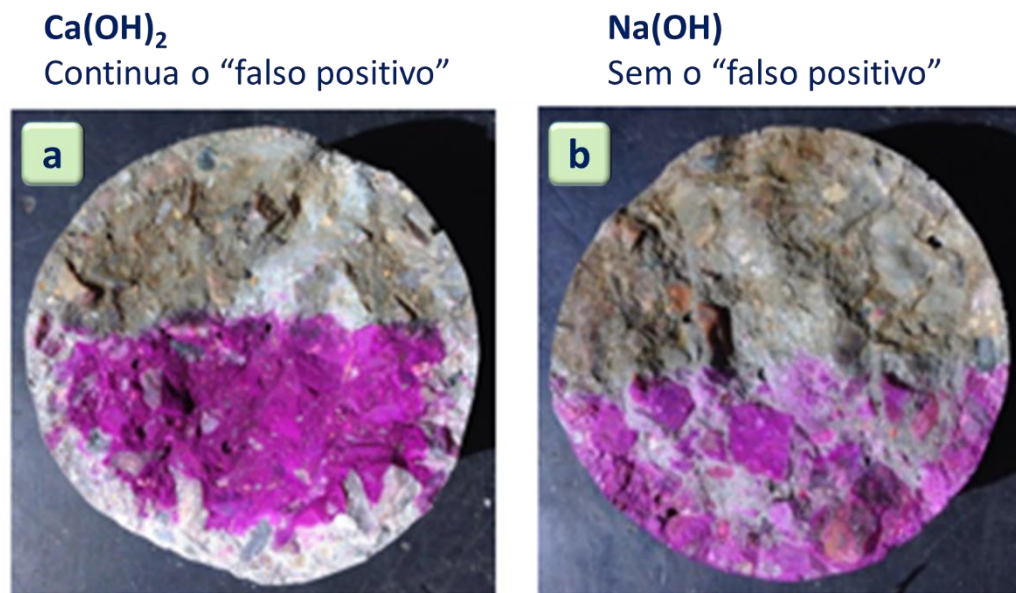


Figura 5. Corpos de prova carbonatados com (a) aspersão prévia de solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (b) aspersão prévia de solução de NaOH .

4.2 Concreto carbonatado – Com cloretos:

Após a imersão das amostras de concreto na solução de cloreto de sódio no ensaio de migração de cloretos, mediu-se a profundidade de penetração de íons cloreto ao término dos ciclos de 24 horas, 48 horas e 72 horas de ensaio (Figura 6-a). Essa medição foi realizada com a aplicação prévia da solução de hidróxido de sódio, eficaz em alcalinizar o concreto carbonatado como indicado na Figura 5. Este procedimento foi realizado para impedir a ocorrência do resultado “falso positivo” que a solução de nitrato de prata apresenta em amostras carbonatadas.

A entrada de cloretos ocorreu gradativamente ao longo do tempo de ensaio e a profundidade final de penetração de cloretos no concreto foi de 26,8 mm.

A Figura 6-b mostra o perfil de cloretos totais determinado no concreto deste experimento, após 72 h de migração com a ddp de 30 V. Os dados mostram a coerência do resultado de profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico, de modo que a viragem de cor ocorreu a partir do teor de cloretos de 0,08% em relação a massa de cimento. Esta comparação foi realizada de modo a obter uma comprovação da coerência do método proposto para determinação da profundidade de penetração de cloretos.

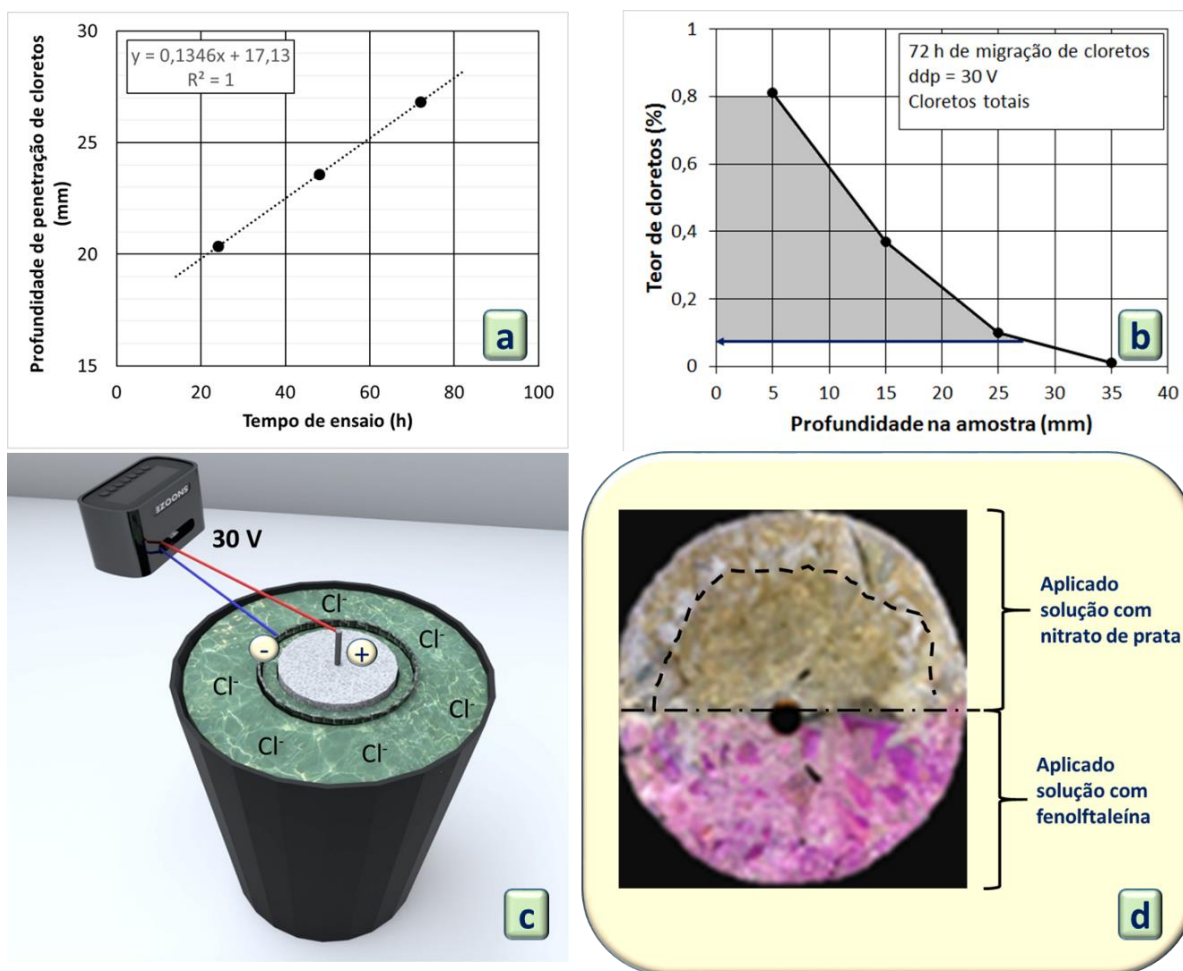


Figura 6. Resultados nos corpos de prova de concreto carbonatado e contaminado com cloretos: (a) Profundidade de penetração de cloretos com o método colorimétrico; (b) Perfil de cloretos para verificar a eficácia do método colorimétrico; (c) Ilustração da aceleração do ingresso de cloretos por migração; (d) Corpos de prova carbonatados e com penetração de cloretos - tratamento prévio com solução de NaOH e posterior aplicação de solução de AgNO_3 .

A Figura 6-c ilustra o experimento de migração de íons cloretos e a Figura 6-d mostra uma foto de um corpo de prova após a aplicação do método colorimétrico. Esta foto mostra um corpo de prova recém fraturado cuja superfície foi previamente tratada com aspersão de solução de NaOH e posteriormente foi aplicada a solução de AgNO_3 . Mais uma vez observou-se que a solução de hidróxido de sódio eliminou o efeito “falso positivo” gerado pela carbonatação do concreto no método de aspersão de nitrato de prata. Isso fica evidente, pois a região das amostras com aspersão de fenolftaleína não identificou a área carbonatada, apenas a seção com solução de AgNO_3 gerou mudança de coloração nas regiões com presença de cloretos livres, já que nesta fase as amostras estavam carbonatadas e contaminadas por cloretos.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um caminho possível para o emprego do método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata em condições de serviço em que existe a exposição do concreto armado ao ataque por cloretos e ao processo de carbonatação de forma concomitante. O trabalho indica o que pode ser feito antes da aplicação da solução de nitrato de prata para evitar o “falso positivo”, que tem impedido o uso deste método colorimétrico em trabalhos de inspeção em obra reais.

Neste contexto, conclui-se que o passo a passo a seguir é eficaz para viabilizar o emprego do método colorimétrico com nitrato de prata para obter a profundidade de penetração de cloretos no concreto em situações em que o mesmo está exposto a penetração de cloretos e ao processo de carbonatação.

Os passos são:

Passo 1 – Parte da peça de concreto deve ser seccionada e na superfície recém fraturada, aplica-se por aspersão uma solução aquosa saturada de hidróxido de sódio (150 g/L). Deve-se esperar cerca de uma hora para a superfície secar;

Passo 2 – Aspergir duas vezes sucessivamente (5 minutos de intervalo entre cada vez), uma solução de nitrato de prata na concentração de 0,10 mol/L. Deve-se esperar cerca de uma hora para a superfície secar e as reações ocorrerem, gerando o contraste de cor. Como ilustrado na Figura 7, a coloração marrom correspondente à região sem cloretos, e a outra sem mudança de cor corresponde a região afetada por cloretos;

Passo 3 – Efetivar a medida da profundidade de penetração de cloretos usando uma régua ou um paquímetro. Trabalhar com valores médios, mínimos e máximos de profundidade de penetração de cloretos para interpretar os resultados.



Figura 7. Ilustração do contraste obtido com a aplicação do método colorimétrico para a determinação da profundidade de penetração de cloretos, usando aspersão de uma solução de NaOH e uma de AgNO_3 .

6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam a sua gratidão as agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pela bolsa e apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Centro Politécnico, ao Departamento de Construção Civil (DCC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC).

7. REFERÊNCIAS

- ASTM International. (2020). *ASTM C1152/C1152M-20 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. https://doi.org/10.1520/C1152_C1152M-20
- Azarijafari, H., Azarijafari H., Tajadini, A., Rahimi, M., Berenjian, J. (2018), *Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials*. *Construction and Building Materials*. 166: 889-897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.121>
- Baroghel-Bouny, V., Belin, P., Maultzsch, M., Henry, D. (2007), *AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions*. *Materials and Structures*. 40: 759-781. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9233-1>
- Cascudo, O. (1997), *"Controle da Corrosão de Armaduras em concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas"*. PINI, 1.ed., São Paulo, Brasil.
- Corral, R., Arredondo, S., Almaral, J., & Gómez, J. (2013). *Chloride corrosion of embedded reinforced steel on concrete elaborated from recycled coarse aggregates and supplementary cement materials*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1): 21-35. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732013000100002>
- Fernández-Ruiz, M. A., Gil-Martín, L. M., Carbonell-Márquez, J. F., Hernández-Montes, E. (2018), *Epoxy resin and ground tyre rubber replacement for cement in concrete: Compressive behaviour and durability properties*. *Construction and Building Materials*. 173: 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.004>
- Ferreira, R. M., Castro-Gomes, J. P., Costa, P., & Malheiro, R. (2016). *Effect of metakaolin on the chloride ingress properties of concrete*. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1375-1384. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0131-8>
- França, C. B. (2011), *"Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata"*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 85 p.
- He, F., Shi, C., Yuan, Q., Chen, C., Zheng, K. (2012), *AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete*. *Construction and Building Materials*. 26: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.003>
- He, F., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Tong, B. (2018), *Corrosion of cement pastes made of CEM I and CEM III/A caused by a saturated water solution of ammonium chloride after 4 and 25 days of aggressive immersion*. *Construction and Building Materials*. 170: 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.073>
- Helene, P. (1993), *"Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado"*. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 231 p.
- Kim, M-Y., Yang, E-I., Yi, S-T. (2013), *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. *Construction and Building Materials*. 41: 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.084>

- Lau, P. C., Teo, D. C. L., Mannan, M. A. (2018). *Mechanical, durability and microstructure properties of lightweight concrete using aggregate made from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials. 176: 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.179>
- Medeiros, M. H. F. (2008), "*Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos*". Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Helene, P. (2009a), *Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions*. Marine Structures. 22: 128-141. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2008.09.003>
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009b), *Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption*. Construction and building materials. 23(3): 1476-1484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.01>
- Medeiros, M. H. F., Gobbi, A., Réus, G. C., Helene, P. (2013), *Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore*. Construction and Building Materials. 44: 452-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.078>
- Medeiros Junior, R. A., Lima, M. G., Brito, P. C., Medeiros, M. H. F. (2015a), *Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions*. Ocean Engineering. 103: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.079>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Yazigi, R., Medeiros, M. H. F. (2015b), *Carbonation depth in 57 years old concrete structures*. Steel and Composite Structures. 19(4): 953-966. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.4.953>
- Medeiros, M. H. F. D., Raisdorfer, J. W., & Hoppe Filho, J. (2017). Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. Ambiente Construído, 17(4), 125-139. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>
- Medeiros, M. H. F., Réus, G. C., Pontes, C. V. (2018), "Nitrito de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica". in: 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, 2018, Curitiba., v. único. pp. 35-46. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.017>
- Montemor, M. F., Simões, A. M. P., Ferreira, M. G. S. (2003), *Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques*. Cement and Concrete Composites. 25: 491-502. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00089-6)
- Moreira, C. (2006), "*Recalibração de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina*". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 122 p.
- Pauletti, C. (2004), "*Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 176 p.
- Pontes, C. V., Réus, G. C., Araújo, E. C., Medeiros, M. H. F. (2020), *Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: how to prevent false positives*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101860>
- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015), *Método colorimétrico por aspersão de nitrito de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*. Revista Alconpat. 5(2): 149-159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Réus, G. C. (2017), "*Recalibração química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas*". Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 104 p.

- Réus, G. C., Medeiros, M. H. F. (2020), *Chemical realkalization for carbonated concrete treatment: Alkaline solutions and application methods*. Construction and Building Materials, 262, 120880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120880>
- RILEM. TC 178-TMC - Testing and modelling chloride penetration in concrete. Madrid: Elsevier; 2013. p. 3.
- Vennesland, Ø., Climent, M. Á., Andrade, C. (2013). *Recommendation of RILEM TC 178-TMC: Testing and modelling chloride penetration in concrete*. Materials and Structures. 46: 337-344. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9968-1>
- Slonka-Slupik, B., Podwórny, J., Staszuk, M. (2018), *Corrosion of cement pastes made of CEM I and CEM III/A caused by a saturated water solution of ammonium chloride after 4 and 25 days of aggressive immersion*. Construction and Building Materials. 170: 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.073>
- Yuan, Q., Shi, C., He, F., Schutter, G. D., Audenaert, K., Zheng, K. (2008), *Effect of hydroxyl ions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method*. Cement and Concrete Research. 38: 1177-1180. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.04.003>
- Wei, Y., Guo, W., Liang, S. (2018), *Chloride Ingress in Internally Cured Concrete under Complex Solution*. Journal of Materials in Civil Engineering. 30(4) p. 04018037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002215)
- Weiss, J., Couch, J., Pease, B., Laugesen, P., Geiker, M. (2017), *Influence of Mechanically Induced Cracking on Chloride Ingress in Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering 29(9): 04017128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001922)

Proposta de avaliação de danos para duas pontes localizadas na rodovia No. 14 no estado de Sonora, México, usando a variável de rigidez como parâmetro de comparação global

G. Ramos-Torres^{1*}, H. Navarro-Gómez², E. Perez-Isidro²,
J. Gautherau-Lopez¹, I. Palma-Quiroz²

* Autor de Contato: calculista@prodigy.net.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.454>

Recepção: 16/01/2020 | Aceitação: 23/10/2020 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O método da variável de rigidez elástica permite obter a resposta mecânica da superestrutura da ponte; baseia-se na resposta ao impacto de massas conhecidas aplicadas ao centro do vão (luz) para obter o deslocamento máximo que define a rigidez do ponto, este é comparado com os valores da curva formada com as variáveis de rigidez, construídos a partir do características do projeto estrutural da ponte. O método foi implantado em duas pontes localizadas na rodovia federal nº 14 do Estado de Sonora Mex., com resultados compatíveis com os danos manifestados. A avaliação é qualitativa a partir de um parâmetro global, obtido em condições ambientais na ausência de vento e a temperatura constante, adequado para o diagnóstico do estado estrutural presente, havendo limitações em pontes esconsas.

Palavras-chave: pontes; superestrutura; impacto; resposta mecânica; rigidez.

Citar como: Ramos-Torres, G., Navarro-Gómez, H., Perez-Isidro, E., Gautherau-Lopez, J., Palma-Quiroz, I. (2021), “Proposta de avaliação de danos para duas pontes localizadas na rodovia No. 14 no estado de Sonora, México, usando a variável de rigidez como parâmetro de comparação global”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 89 – 108, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.454>

¹Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, México.

²Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor Ramos-Torres, G. contribuiu com 30%, o autor Navarro-Gómez, H. contribuiu com 25%, o autor Perez-Isidro, E. contribuiu com 15%, o autor Gautherau-Lopez, J. contribuiu com 15% e o autor Palma -Quiroz, I. contribuiu com 15%..

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Damage assessment proposal for two bridges located on Highway No. 14 in the State of Sonora México by using stiffness invariant as global comparison parameter

ABSTRACT

The elastic rigidity invariant method is used to obtain the mechanical response of the superstructure of simply supported bridges; it is based on the bridge's response to the impact of known masses applied on mid span to obtain the maximum displacement that defines the point stiffness. This value is compared with the values of the theoretical curve formed with the stiffness invariants, constructed from the design characteristics of the bridge. The method was implemented in two bridges located on federal highway No. 14 of the State of Sonora Mex., with results according to the damage manifested. The evaluation is the result of a global parameter, obtained in environmental conditions in the absence of wind and at a constant temperature, suitable for the diagnosis of the present structural state, having limitations on bridges with screw cross sections.

Keywords: bridges; superstructure; impact; mechanical response; stiffness.

Propuesta de evaluación de daño para dos puentes ubicados en la carretera No. 14 en el estado de Sonora México usando invariante de rigidez como parámetro global de comparación

RESUMEN

El método de la invariante elástica de rigidez permite obtener la respuesta mecánica de la superestructura de puentes; se basa en la respuesta al impacto de masas conocidas aplicadas al centro del claro para obtener el máximo desplazamiento que define la rigidez puntual, éste se compara con los valores de la curva formada con los invariantes de rigidez, construida a partir de las características de diseño del puente. El método se implementó en dos puentes localizados en la carretera federal No. 14 del Estado de Sonora Mex., con resultados acordes a los daños manifestados. La evaluación es cualitativa a partir de un parámetro global, obtenido en condiciones ambientales en ausencia de viento y a temperatura constante, adecuado para el diagnóstico del estado estructural presente, teniendo limitantes en puentes esviados.

Palabras clave: puentes; superestructura; impacto; respuesta mecánica; rigidez.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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

Em todo o mundo, o projeto e construção de pontes é regido pelas normas regionais correspondentes e envolve uma série de estudos anteriores ao seu projeto e construção que são apoiados por pesquisas permanentes destinadas a reduzir o risco de colapso ou falhas prematuras. Esses padrões incluem protocolos de manutenção operacional, no entanto, falhas, danos e até mesmo o colapso ocorrem com frequência. Uma amostra de 384 pontes colapsadas em todo o mundo no período de 1944 a 2004 revelou que 28% desabaram devido a causas naturais, 21% devido a erros de projeto, 18% devido a impacto, 10% devido à sobrecarga, 10% devido a erros construtivos, 10% de causas desconhecidas, 2% por corrosão e 1% por vandalismo (Imhof, 2004). A maior dificuldade na inspeção de estruturas de pontes é obter um índice de dano para a tomada de decisões de manutenção, reparo ou substituição.

Um resumo de alguns métodos de obtenção de resposta mecânica em pontes é apresentado a seguir. Para faixas não lineares, foi proposto o método da rótula plástica dinâmica; trata-se de obter a curva modal de carga-deformação a partir de um modelo com um grau de liberdade. A estrutura é submetida à aceleração de um determinado impacto ou tremor até que seja obtida a resposta máxima, que ocorre no momento em que se atinge a plastificação de uma rótula proposta anteriormente, transformando o sistema em um mecanismo.

Este método simplificado permite visualizar a demanda de ductilidade da estrutura (E. Maldonado, et al. 1998). Por meio de métodos numéricos, pode-se obter um fator de amplificação que considera os efeitos dinâmicos aplicáveis aos elementos de projeto mecânico de pontes contínuas, considerando vigas flexíveis e cargas móveis amortecidas pela suspensão dos trens-tipo analisados. A equação do movimento da ponte é assumida em vibração forçada pela equação do movimento do caminhão de ensaio que possui um ponto de aplicação de carga por eixo, a viga é idealizada como uma série de massas concentradas em intervalos discretos uniformemente distribuídas em seu comprimento total e os efeitos do carregamento do caminhão são calculados no eixo dianteiro; Esse procedimento permite obter um fator de impacto para a carga móvel, também conhecido como fator de amplificação dinâmica, que resulta das curvas de deslocamento geradas tanto para carga estática quanto para carga dinâmica.

O procedimento permite incluir um fator de atrito devido à participação da suspensão do caminhão analisado (N. Munirudrappa et al. 1999). O método das funções de resposta em frequências consiste na obtenção de uma matriz característica da estrutura, que é função da massa, do amortecimento e da sua rigidez. É obtido pela inversão da matriz de cofatores do vetor de funções de frequência das transformadas de Fourier da equação do movimento e é conhecido como matriz de funções de resposta em frequência. Esta matriz possui apenas as propriedades da estrutura e é independente da excitação, portanto qualquer alteração nela gerada deve-se a alterações na constituição da estrutura. Se necessário conhecer a matriz das funções de resposta em frequência, os vetores de deslocamento e suas forças de excitação devem ser conhecidos em termos de suas transformadas de Fourier. Pode-se resumir que é um método complexo, pois requer um número muito maior de sensores e um grande processamento numérico que acopla os efeitos locais e globais em comparação ao método de análise modal.

O método de análise de sensibilidade consiste em obter um fator de sensibilidade equivalente ao quociente entre a taxa de variação da frequência e a taxa de variação da rigidez. Este método ajuda a selecionar os parâmetros com maior impacto na resposta e a descartar possíveis erros na instrumentação experimental, de forma que permite escolher os valores mais significativos ou de maior impacto e visualizar os elementos estruturais com a maior contribuição para os efeitos dinâmicos, com os quais é possível determinar com boa precisão os pontos onde os sensores devem ser colocados para estudos experimentais. Um grupo de métodos experimentais que classifica métodos de simulação numérica, onde podem ser usados métodos numéricos como Runge-Kutta,

Euler, etc., que resolvem as equações diferenciais de movimento a partir do Jacobiano do quociente entre a taxa de variação das forças e a taxa de variação dos deslocamentos cujas soluções reais devem ser negativas para garantir a estabilidade do método e sua integração no tempo.

Em suma, o método dos elementos finitos é o mais utilizado para resolver as equações do movimento, pois utiliza discretização e interpolação por meio de funções compatíveis com os esforços e deformações, considerando o equilíbrio interno, o equilíbrio na fronteira e a compatibilidade das deformações dos elementos discretos que são resolvidos por integração direta e montados em sistemas lineares de equações sempre que as equações diferenciais sejam ordinárias (Carrión FJ et al. 1999). Um modelo para conhecer os efeitos da temperatura comparados aos efeitos do dano na mudança da frequência natural das pontes em um vão, utilizando modelos de elementos finitos para vigas em caixão e vigas protendidas tipo ASHHTO; a conclusão do trabalho indica que as mudanças na frequência da superestrutura de uma ponte de um vão devido aos efeitos térmicos, são semelhantes aos efeitos dos danos acumulados durante um longo período de tempo devido ao amortecimento temporal (Balmes Etienne et al., 2005).

Foi realizado um estudo por meio da instrumentação de duas pontes em laje e vigas protendidas, ambas de dois vãos independentes; a captura foi realizada por meio de sensores de aceleração, que com métodos numéricos foi possível conhecer os espectros de velocidades e deslocamentos. Da mesma forma, com uma filtragem de frequência adequada, foi possível separar os efeitos estáticos e dinâmicos do espectro obtido. A avaliação dos resultados indica que os fatores de impacto obtidos por meio do quociente entre o efeito dinâmico da carga e o efeito estático da mesma, sob certas condições de massa e velocidade do veículo de ensaio, superam aqueles estabelecidos nas normas de projeto regionais (Valdez J. et al. 2008). Uma análise comparativa para obter a resposta dinâmica de uma ponte de concreto armado localizada na Itália usando um modelo de elementos finitos com elementos do tipo Shell e a excitação de um caminhão típico em diferentes velocidades.

A análise teórica foi realizada assumindo a inexistência de fissuras para ignorar a contribuição da armadura de aço na estimativa da rigidez. Os resultados obtidos na análise indicaram que com o caminhão não foi possível obter os parâmetros dinâmicos básicos, então foi utilizado um comboio contínuo de caminhões, oferecendo resultados mais condizentes com a realidade; o contraste foi realizado com os dados obtidos da aplicação no local de excitação por meio de um vibrador elétrico colocado no quarto do vão da ponte e colocando uma série de 17 sensores de aceleração para obter a resposta em tempo real.

Os resultados obtidos na análise apresentaram erros de 1% a 46% em relação às frequências obtidas no local, sendo a frequência de torção a de menor erro e a do quarto modo de flexão a de maior erro (Velas H. et al. 2011). Uma metodologia para determinar a deterioração por fadiga da superestrutura de pontes de concreto armado, utilizando técnicas de Montecarlo; o método estima probabilisticamente de acordo com os dados estatísticos o número de ciclos de carga e seu impacto no nível de tensão de acordo com os modelos de dano mais populares que permitem uma estimativa do tamanho da fissura. Este método é especulativo e pode ser aplicado com relativa facilidade se as estatísticas de funcionamento da ponte em análise forem conhecidas, no entanto, conforme apresentado, não inclui fatores como cargas extraordinárias ou terremotos e efeitos de corrosão, entre outros, (Crespo E. et al.. Al. 2013).

Os resultados da aplicação do método de vibrações ambientais (razão espectral) aplicado à instrumentação de uma ponte pós-tensionada permitiu avaliar o estado atual da superestrutura. Os resultados da instrumentação foram comparados com os resultados do modelo estrutural elaborado em um software comercial. (Viviescas Al. Et al. 2017).

2. METODOLOGIA

Da infraestrutura de pontes em rodovias federais no México, 57% são construídas em concreto armado, seguido por 28% construídas em concreto protendido, 7% são construídas em aço e concreto, 6% em aço estrutural, 1% em alvenaria e 1% em sistema de vigas pré-fabricadas (IMT-2014). De acordo com as estatísticas do Instituto Mexicano de Transporte, o maior número de pontes é construído em concreto armado, portanto, nesta pesquisa são estudadas duas pontes de concreto armado, uma constituída de lajes maciças e outra construída sobre vigas e lajes com diafragmas de concreto armado.

O presente trabalho consiste na aplicação de uma metodologia que utiliza parâmetros globais; inclui a rigidez pontual real da estrutura, que é obtida a partir de medições de campo na estrutura real; o valor obtido é comparado com o valor de rigidez obtido a partir dos parâmetros de projeto da ponte que resultam da função variável de rigidez; o quociente entre estes valores corresponde à capacidade residual da estrutura, permitindo obter um índice de dano.

2.1. Conceitos gerais.

O comportamento mecânico de uma estrutura sob cargas de serviço depende do nível de esforços realizados e do número de repetições ou ciclos de carga; fatores como deterioração, corrosão, fadiga e / ou aumento do nível de cargas de serviço podem gerar danos permanentes que modificam as condições de sua resposta mecânica. As considerações de projeto para o desempenho de uma estrutura contemplam o comportamento mecânico linear elástico e é considerada saudável desde que preservada. Quando o dano acumulado modifica seu comportamento, começa o comportamento não linear onde a proporção entre os deslocamentos e as cargas aplicadas não é mais constante; é sob este princípio básico que o método proposto oferece informações sobre o estado atual da estrutura.

A Figura 1 apresenta o comportamento mecânico de um sistema estrutural sob carga monotônica com aumento gradual da carga; primeiramente, observa-se uma reta que começa na origem e atinge a coordenada (δ_E, P_E) , correspondendo (δ_E) ao deslocamento até o limite elástico linear e (P_E) à carga no mesmo limite; a parte curva indica que o sistema estrutural tem um comportamento não linear.

O método proposto considera que se forem aplicadas três cargas pontuais crescentes, obtém-se um gráfico carga-deslocamento que descreve um comportamento mecânico muito semelhante ao real; A partir dos incrementos de carga aplicada, juntando as coordenadas dos três pontos, obtêm-se duas retas que possuem a mesma inclinação se trabalhando em faixa linear ou secante à curva tensão-deformação real da estrutura se o trabalho for em faixa não linear; se os incrementos de carga são pequenos, as áreas superior e inferior da curva real são muito semelhantes às áreas superior e inferior dos gráficos das linhas obtidas, reduzindo o erro do método. As áreas descritas fornecem uma maneira de medir os danos.

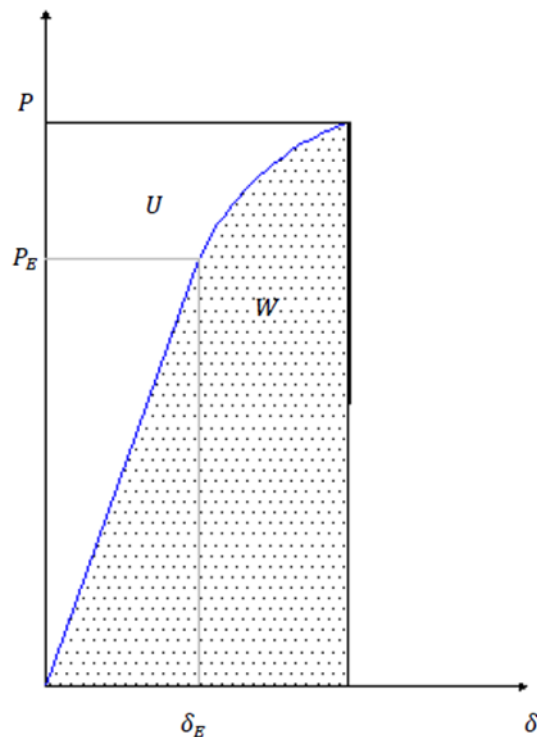


Figura 1. Relação carga deslocamento

2.2. Avaliação de danos.

A Figura 1 está dividida em duas regiões, uma inferior cuja área corresponde ao trabalho W que foi produzido durante o processo de carregamento e uma superior cuja área corresponde à energia de deformação U armazenada pela estrutura, o que lhe permite recuperar total ou parcialmente sua forma original se a carga for removida. Quando o comportamento mecânico da estrutura é elástico-linear, o trabalho e a energia de deformação têm a mesma magnitude, o que implica que a estrutura pode recuperar sua configuração original se as cargas forem removidas; se o comportamento for não linear, os valores do trabalho realizado e da energia de deformação armazenada são diferentes, o que implica que, quando a carga for retirada, a estrutura recuperará parcialmente sua configuração.

Desconsiderando a energia gerada na forma de calor, se a estrutura tiver comportamento não linear, a energia de deformação armazenada é menor que o trabalho realizado pelo sistema. Esta consideração é aplicável em estruturas de concreto armado.

Existem algumas expressões semi-empíricas para avaliar os danos em estruturas de concreto armado obtidas em ensaios experimentais; uma das expressões que permite obter um índice de danos considerando a inclinação da parte elástica da curva de descarga, é definida pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

Onde d é equivalente a um índice de dano, Z corresponde à inclinação da parte elástica do ramo de descarga e Z_0 é o valor da inclinação do ramo elástico inicial (Perdomo M. E. et al, 2006). Para comportamento elástico, a expressão tem valor nulo e para o comportamento inelástico próximo à

falha o valor é próximo da unidade. Com esta expressão, pode-se obter uma curva de restituição de energia para os elementos de ensaio e obter o índice de danos gerado antes da falha, a dificuldade de sua utilização implica a realização de ensaios experimentais para cada tipo de elemento estrutural.

De acordo com a proposta do presente trabalho, a deformação real é obtida a partir da dupla integração do espectro aceleração-tempo que resulta do impacto aplicado à estrutura real com massas e alturas conhecidas em queda livre, considerando a amplitude máxima do deslocamento para os cálculos.

Conhecendo as massas, a altura em queda livre e os deslocamentos máximos, o gráfico da energia cinética vs. deslocamento, identificando a zona superior da curva com área A_{sup} , análoga à densidade de energia de deformação U e a região inferior com área A_{inf} , análoga à densidade de trabalho realizado W cujo quociente Δk é considerado como uma medida de dano, com base no mudança energética devido à diminuição da rigidez do sistema devido a danos e é aplicável à carga de ensaio mais alta.

$$\Delta k = \frac{A_{sup}}{A_{inf}} \quad (2)$$

2.3. Variável elástica de rigidez.

É formado com os valores de rigidez abaixo do limite de proporcionalidade ao longo do comprimento de um elemento estrutural. Em (3) K , corresponde ao valor de rigidez teórico de projeto, F corresponde à força aplicada e δ é o deslocamento resultante.

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (3)$$

Se for aplicado o princípio do trabalho virtual e considerando apenas a contribuição do momento fletor, a expressão para a rigidez em um ponto corresponde a (4).

$$K = F \left[\int_0^l \frac{M^* M}{EI} dx \right]^{-1} \quad (4)$$

Se o valor da força F for mantido constante ao longo de cada ponto da estrutura, a curva de rigidez é obtida e tem o caráter de invariante em cada ponto abaixo do limite de proporcionalidade.

De acordo com a figura 2, se F for aplicado na coordenada $X = a$, é necessário determinar a flecha δ e a rigidez $K(a)$.

$$\delta = \left(\frac{a^3 b^2 + a^2 b^3}{3EI^2} \right) F \quad (5)$$

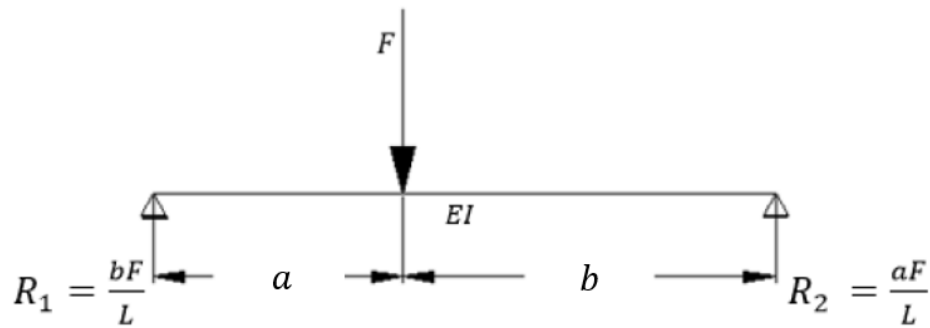


Figura 2. Relação carga deslocamento

Conhecendo o deslocamento, a rigidez é obtida na coordenada $x = a$; considerando $b = L - a$, onde (6) é o invariante de rigidez aplicado para vigas e (7) invariante para lajes maciças.

$$K(x) = \frac{3EI L^2}{x^3(L-x)^2 + x^2(L-x)^3} \quad (6)$$

$$K(x) = \frac{3EI L^2}{(x^3(L-x)^2 + x^2(L-x)^3)(1-\nu^2)} \quad (7)$$

2.4. Medição da rigidez pontual real.

A rigidez real do ponto é obtida com o deslocamento máximo que ocorre ao submeter a superestrutura a cargas de impacto aplicadas ao centro do vão; para a excitação, são utilizadas pequenas massas que modificam minimamente os parâmetros dinâmicos da estrutura. Para calcular a força de impacto F_R , se recorre às expressões fundamentais da mecânica descritas abaixo:

$$v = \sqrt{2gh} = \text{velocidade de impacto} \quad (8)$$

g = aceleração da gravidade

h = altura de queda

Como o impacto é feito em meio deformável, a magnitude da força depende da rigidez da reação; (9) corresponde à energia cinética no momento do impacto.

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = m g h = \text{Energia cinética.} \quad (9)$$

m = massa.

Do gráfico de energia cinética-deslocamento, como já mencionado, a área superior da curva A_{sup} , é análoga à energia de deformação (U) e a área inferior A_{inf} , é análoga ao trabalho realizado (W), pelo que Δk corresponde a um fator de rigidez residual, que com um valor unitário indica saúde estrutural e qualquer valor inferior à unidade, indica dano permanente ao sistema estrutural.

O fator de rigidez residual Δk (2) é aplicável a estruturas de concreto armado; corresponde ao aumento da fissuração da seção transversal, devido à fluência da armadura devido ao acúmulo do dano, o que se reflete na diminuição da área de compressão uma vez que a fissuração, à medida que o aço recebe maior deformação, cresce na zona de tensão e, portanto, o momento de inércia da seção transversal é reduzido, expresso por I_D para sua consideração dentro do método (10). Para saber o valor da rigidez real presente, é necessário obter a força efetiva quando a energia cinética é zero no instante do deslocamento máximo. O valor da força real para cada grupo de impactos é obtido a partir da utilização de (11) considerando a carga de impacto aplicada ao centro do vão.

$$I_D = \Delta k I_{crt} \quad (10)$$

$$\overline{F_R} = \frac{48EI_D}{L^3} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (11)$$

Com (12), a rigidez atual presente K_R é obtida; $\overline{F_R}$ corresponde à força de impacto efetiva média e $\overline{\delta}$ à média dos deslocamentos medidos no campo para cada massa.

$$K_R = \frac{\overline{F_R}}{\overline{\delta}} \quad (12)$$

$$d_e = 1 - \frac{K_R}{K} \quad (13)$$

Em (13), d_e é considerado um índice de dano e é uma medida da degradação ou diminuição da rigidez, em estruturas saudáveis o valor é nulo, para o colapso é próximo da unidade e depende das características de cada estrutura. No método proposto, a pré-carga do sistema corresponde à carga permanente da estrutura, que pode ser da ordem de até 85% da capacidade total da mesma, o que permite utilizar pequenos incrementos de carga para obter deformações em zonas avançadas do envelope da curva de tensão x deformação de histerese.

A Figura 3 mostra o fluxograma da metodologia utilizada para os estudos de caso; Em primeiro lugar, é necessário ter as plantas estruturais do projeto. Para medições em campo, é utilizado um sistema de massa que durante o impacto são acoplados ao movimento da estrutura para evitar rebote, preferencialmente, a quantidade de massa para cada grupo de ensaios deve ter valores proporcionais, a fim de facilitar os cálculos correspondentes. É muito importante que ao escolher as massas de ensaio, a aceleração de resposta da estrutura seja pelo menos 20% abaixo do limite máximo de aceleração do sensor e que os valores de aceleração para cada massa diferente tenham discriminação suficiente para processamento numérico. As demais atividades são apresentadas na mesma figura.

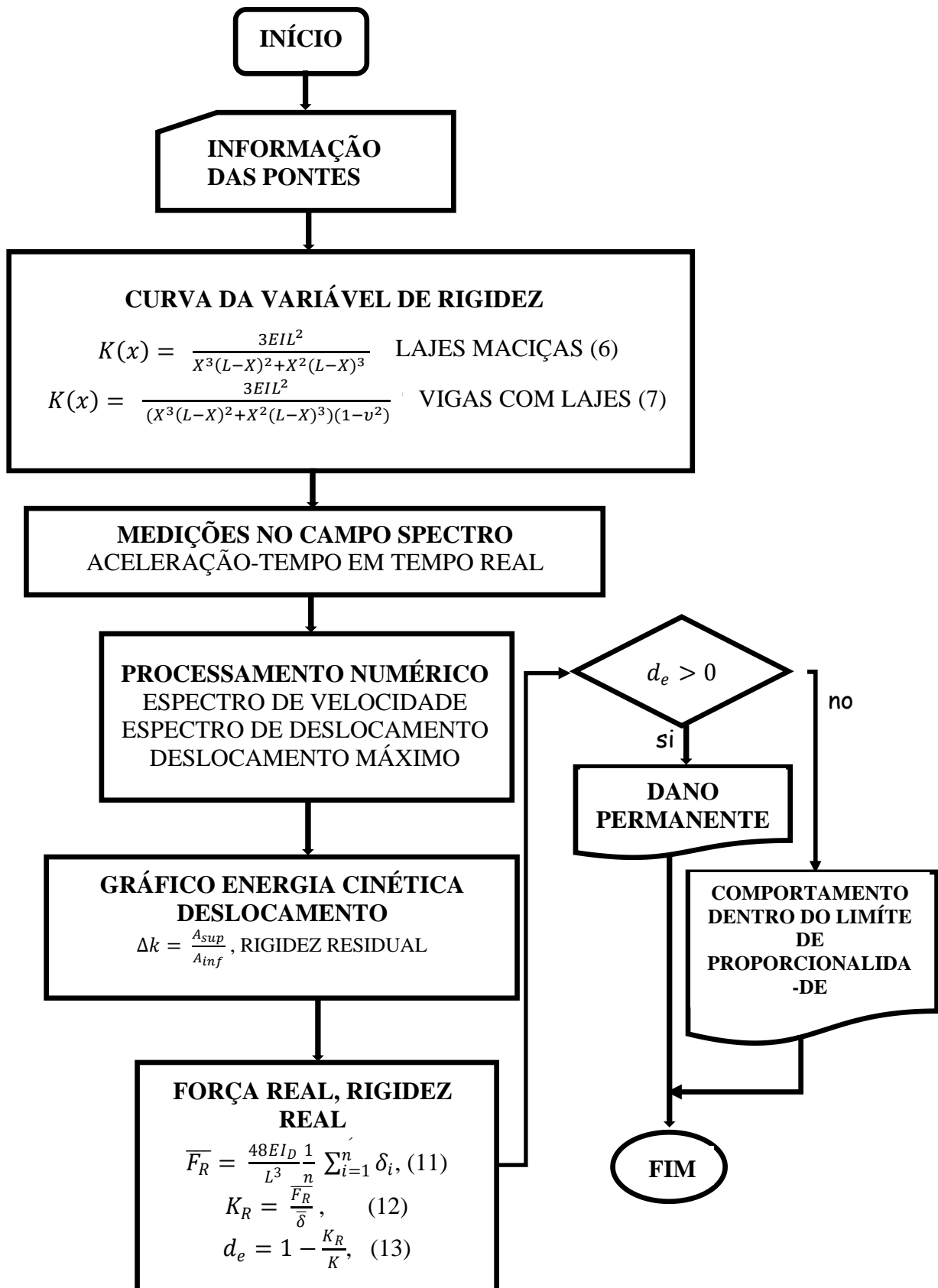


Figura 3. Diagrama de fluxo, Método da variável de rigidez.

3. CASOS DE ESTUDO

As pontes instrumentadas estão localizadas na rodovia federal 14, Hermosillo-Moctezuma, no estado de Sonora, Mex.; uma das pontes leva o nome de "El Testarazo" figura 4, que está localizada no km 23 + 900. A ponte possui uma superestrutura composta por três lajes de concreto armado, simplesmente apoiadas em contrafortes constituídos por paredes de concreto armado. A outra ponte instrumentada é chamada de "El Gavilán" figura 5; A superestrutura é formada por um sistema de vigas, lajes e diafragmas de concreto armado, com seção enviesada em 48° em sua direção transversal, localizada no Km 60 + 100 da mesma via.

3.1. Informação dos casos de estudo.

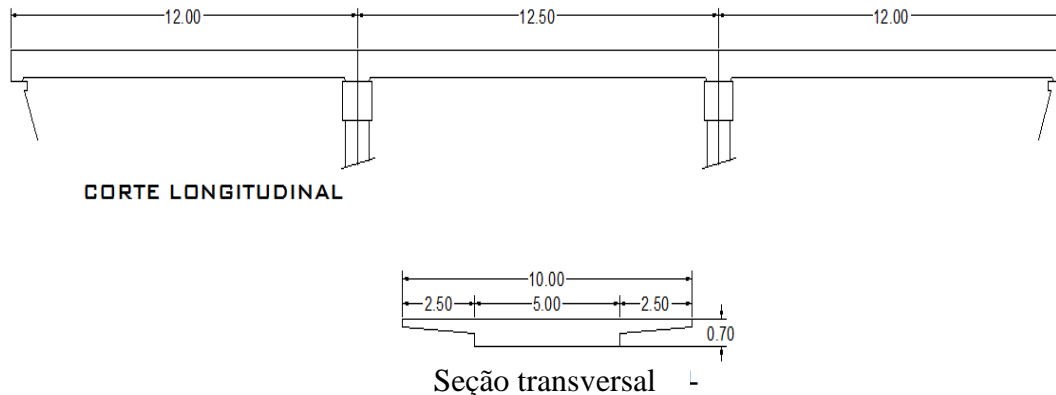


Figura 4. Geometria superestrutura ponte "Testarazo" (Acot. m).

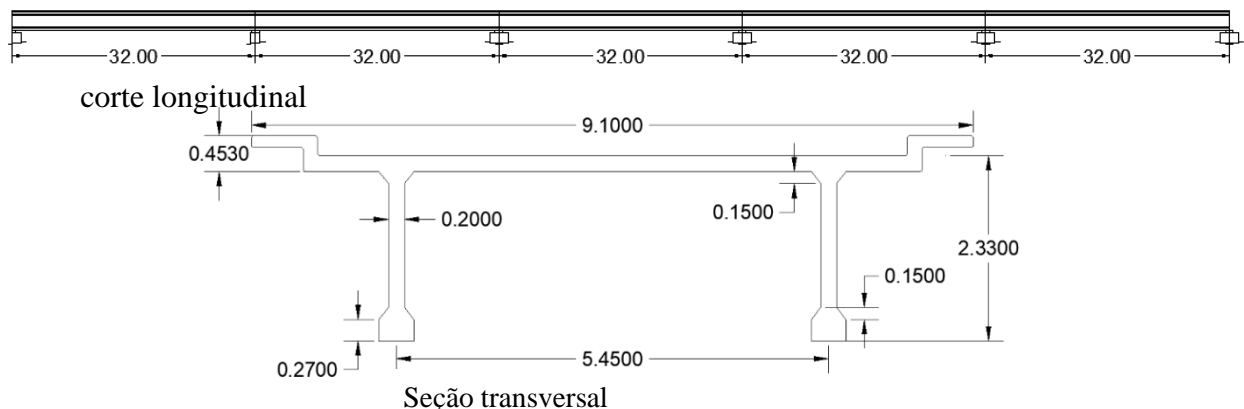


Figura 5. Geometria superestrutura ponte "El Gavilán" (Acot. m).

As propriedades geométricas das seções transversais foram obtidas sob o critério da seção transformada, e os dados do projeto foram obtidos do Projeto Tipo de Elementos de Concreto Armado, Parte I, publicado pela extinta SAHOP.

Tabela 1. Propriedades geométricas seção transformada das pontes (m).

Ponte	b_w	h_f	b_f	n	$A_s(m^2)$	d	k_d	$I_{crt}(m^4)$	$A(m^2)$
Testarazo	5.2	0.30	10.0	8.796	0.035	0.645	0.1858	0.1108	2.95
El Gavilán	1.08	0.18	7.5	8.796	0.0386	2.182	0.481	1.199	2.89

Para a ponte “El Testarazo” $EI = 2.595 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ (para a rigidez da cerâmica maciça); para a ponte El Gavilán $EI = 28.082 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ (para a rigidez da viga). Com esses valores foi obtida a curva de rigidez. Em ambos os casos, apenas os efeitos de flexão são considerados. O valor do módulo de elasticidade do concreto foi considerado $E = 23,414 \text{ MPa}$, com base na expressão $E = 15100\sqrt{f'_c}$ ($\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$).

3.2. Curva da variável de rigidez.

As figuras 6 e 7 mostram os gráficos dos cofatores correspondentes aos invariantes de rigidez para as pontes El Testarazo e El Gavilán, respectivamente, obtidos de (4) para a ponte El Gavilán e de (5) para El Testarazo. Os valores de rigidez do projeto K_E no centro do vão da superestrutura das pontes em estudo são apresentados na tabela 2; os referidos valores resultam do produto dos cofatores ilustrados nas Figuras 6 e 7 com os respectivos valores EI para cada ponte.

Tabela 2. Valores de rigidez sob o limite de proporcionalidade.

Ponte	“El Testarazo”	“El Gavilán”
$K_E(\text{MN/m})$	66.432	41.237

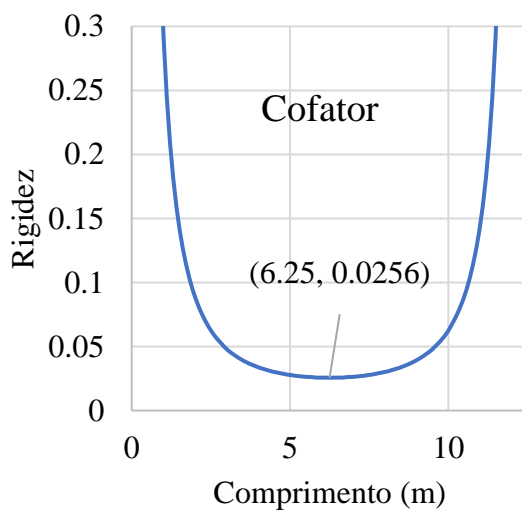


Figura 6. Cofator de rigidez ponte “El Testarazo”

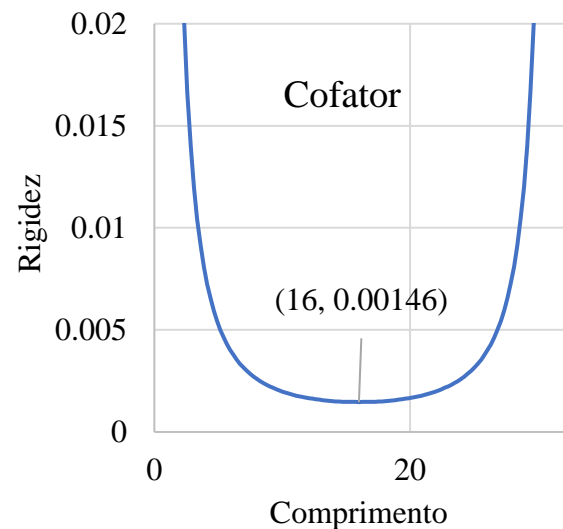


Figura 7. Cofator de rigidez ponte “El Gavilán”

3.3. Procedimento para obter a rigidez real da estrutura.

As medições de campo foram feitas usando uma estrutura para levantamento e descarregamento das massas de excitação, o equipamento consiste em um esqueleto quadrúpede que permite o levantamento das massas por meio de um guincho de capacidade 2250 N; o mecanismo de retenção do recipiente é constituído por um eletroímã com capacidade de 6 kN que permite que a massa de excitação seja fixada por meio de um gancho de segurança com um grau de liberdade de torção (fig. 8).



Figura 8. Aparência geral do equipamento de ensaio de campo.

Foram utilizados recipientes de areia, com comportamento plástico durante o impacto, para evitar rebote. Foram fabricados três sacos de 25, 50 e 75kg de capacidade, os quais foram preenchidos até a massa de ensaio; o impacto foi conseguido elevando-se os sacos a uma altura média de 1,50m, posteriormente, o fluxo elétrico do eletroímã que os segurava foi interrompido para liberá-los e produzir o impacto na superfície de apoio da ponte.

O restante do equipamento é composto por um sensor de aceleração de baixa frequência (0,2 Hz), com sensibilidade de 500 mV / g, colocado no centro do vão que permitiu obter a resposta da ponte em tempo real, além de uma cartão de captura de 4 canais para recepção de 0 a 25 khz; a placa permitiu a captura de sinais analógicos produzidos pelo sensor durante as medições. A placa de captura foi colocada em um chassi com capacidade para oito placas de 11-30 V de 15 W, para operar de -40° a 70° C comunicadas à porta USB do computador portador do software para processar o sinal analógico onde foram obtidos os espectros de aceleração - tempo de resposta da estrutura;

Os sinais analógicos capturados foram processados no Software Labview Signal Express versão 3.0, licença 501701A-00, que permitiu a captura do espectro aceleração-tempo em uma matriz numérica em formato TXT de código ASCII, em estado bruto para processamento numérico. Os espectros de aceleração-tempo obtidos são apresentados nas Figuras 9, 10 e os deslocamentos foram obtidos integrando os espectros com o método de aceleração média constante e aceleração linear.

3.4. Resultado das medições em campo.

As Figuras 9 e 10 apresentam os espectros de tempo de aceleração capturados durante as medições de campo.

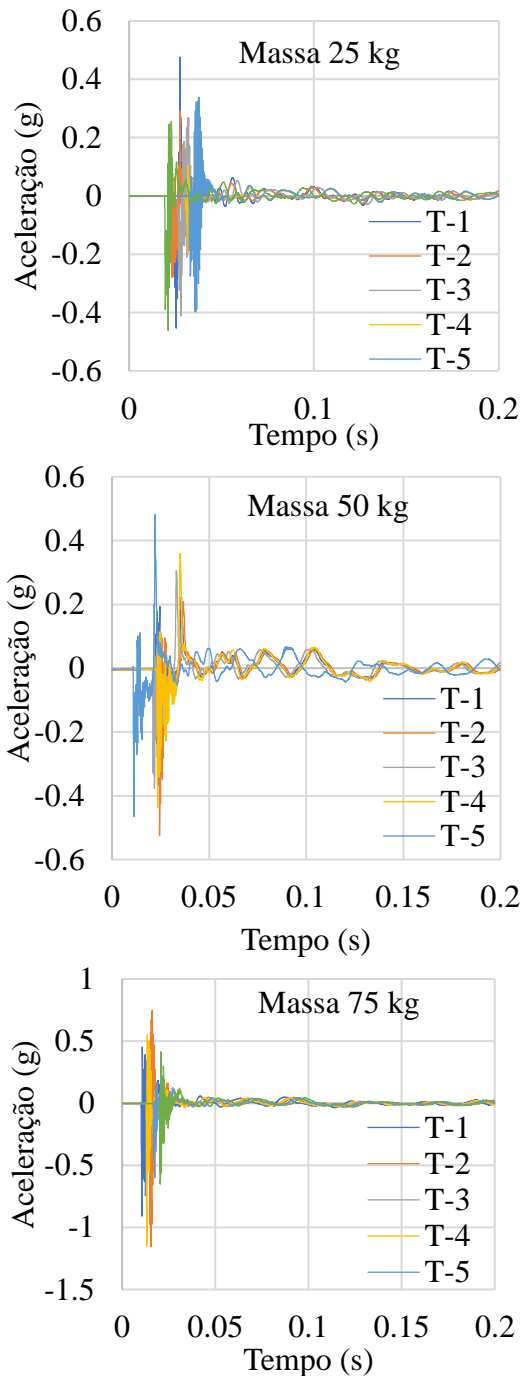


Figura 9. Espectro aceleração-tempo real, ponte "El Testarazo"

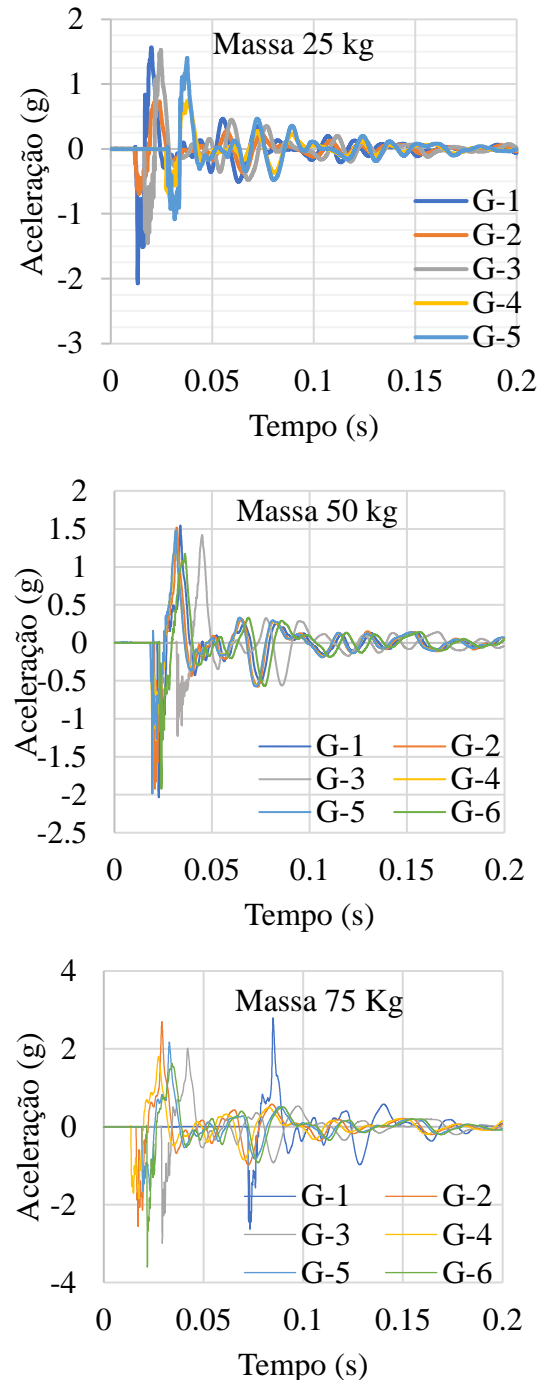


Figura 10. Espectro aceleração-tempo real, ponte "El Gavilán"

Os espectros de aceleração das Figuras 9 e 10 foram submetidos a um tratamento numérico, que consistiu, primeiro, na correção da linha de base espectral e, posteriormente, na dupla integração com os métodos já descritos para obter os deslocamentos máximos produzidos pelo impacto das

massas. As tabelas 3 e 4 mostram os resultados que incluem a massa de ensaio, a altura de queda livre e os deslocamentos obtidos no processamento numérico.

Tabela 3. Resultado de campo e processo numérico puente El Testarazo.

Massa (Kg)	Altura (M)	Deslocamentos (M)
25	1.525	-2.92927E-05
25	1.5	-2.89101E-05
25	1.484	-2.84981E-05
25	1.46	-2.8037E-05
25	1.48	-2.83313E-05
25	1.55	-2.98126E-05
50	1.38	-5.11297E-05
50	1.53	-5.69176E-05
50	1.55	-5.76141E-05
50	1.47	-5.473E-05
50	1.548	-5.7467E-05
50	1.56	-5.77907E-05
75	1.51	-8.83783E-05
75	1.49	-8.69951E-05
75	1.5	-8.74758E-05
75	1.51	-8.85254E-05
75	1.49	-8.7103E-05

Tabela 4. Resultados de campo e processo numérico puente El Gavilán

Massa (Kg)	Altura (M)	Deslocamento (M)
25	1.54	-0.000167776
25	1.52	-0.000141068
25	1.55	-0.00017
25	1.5	-0.00013734
25	1.53	-0.000163631
50	1.5	-0.000260161
50	1.53	-0.000268009
50	1.52	-0.000266636
50	1.5	-0.00026644
50	1.54	-0.000273797
50	1.5	-0.000258101
75	1.67	-0.000491775
75	1.5	-0.000440763
75	1.52	-0.000448023
75	1.4	-0.000412609
75	1.39	-0.000408783
75	1.41	-0.000414767

3.5. Análise estatística de dados obtidos em campo.

Para saber a validade dos dados obtidos nas medições feitas em uma escala natural dos casos de estudo, procedeu-se à análise de variância ou ANOVA; O objetivo principal é saber com a análise bifatorial se os deslocamentos obtidos são dependentes da massa e altura em queda livre utilizadas nos ensaios e descartar a possibilidade de outros fatores terem influenciado os resultados. A hipótese nula H_0 assume que os resultados obtidos são independentes dos fatores de ensaio; a hipótese alternativa H_1 assume que os resultados são dependentes de pelo menos um dos fatores, ambos, para um valor de confiança de 95%.

3.5.1. Análise de variância para os dados da tabela 3.

Tabela 5. Análise de variância bifatorial “El Testarazo”.

	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>Média de quadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	<i>f</i>
Regressão	2	1.04213E-08	5.2107E-09	2866.0866	4.2148E-20	0.05146909
Restos	15	2.72706E-11	1.818E-12			
Total	17	1.04486E-08				

Como a função de distribuição $f < F$, a hipótese nula H_0 é descartada e a hipótese alternativa é

aceita; portanto, afirma-se que os resultados de deslocamento obtidos são dependentes de pelo menos um dos fatores massa e / ou altura de queda livre com um valor de confiança de 95%.

Tabela 6. Análise de variâncias (massa-deslocamento) “El Testarazo”.

<i>Origem das variações</i>	<i>Soma de cuadrados</i>	<i>Graus de liberdade e</i>	<i>Média de cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidade e</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>f</i>
Entre grupos	20018.428	1	20018.4283	93.677634	5.0095E-11	4.1490974	0.0039
Dentro dos grupos	6838.2352	32	213.694853				
Total	26856.663	33					

Como no caso bifatorial, a partir dos valores da Tabela 6, a hipótese nula é descartada e a hipótese alternativa é aceita, pois $f < F$; pode-se afirmar que os deslocamentos obtidos são dependentes da massa aplicada com um valor de confiança de 95%.

Tabela 7. Análise de variâncias (altura-deslocamento) “El Testarazo”.

<i>Origem das variações</i>	<i>Soma de cuadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidade</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>f</i>
Entre grupos	19.1791177 2	1	19.1791	20252.1	2.061E-46	4.149097	0.00399
Dentro dos grupos	0.03030448	32	0.00095				
Total	19.2094222	33					

Como pode ser visto na tabela 7, $f < F$ o que permite descartar a hipótese nula, portanto os deslocamentos obtidos são dependentes das alturas de queda das massas com um valor de confiança de 95%.

3.5.2. Análise de variância para os dados da tabela 4.

Tabela 8. Análise de variância bifatorial “El Gavilán”.

	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma de cuadrados</i>	<i>Média dos cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	<i>f</i>
Regressão	2	2.22636E-07	1.1E-07	322.93	1.93519E-12	0.051481683
Restos	14	4.82596E-09	3.4E-10			
Total	16	2.27462E-07				

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise de variância; uma vez que $f < F$, a hipótese nula H_0 é descartada e a hipótese alternativa é aceita; Portanto, afirma-se que os resultados de deslocamento obtidos são dependentes de pelo menos um dos fatores massa e / ou altura de queda livre com um valor de confiança de 95%.

Tabela 9. Análise de variâncias (massa-deslocamento) “El Gavilán”.

<i>Origem das variações</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidade</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>f</i>
Entre grupos	22518.64	1	22518.639 1	105.37	1E-11	4.1490974 4	0.00399430
Dentro dos grupos	6838.235	32	213.69485 2				
Total	29356.87	33					

Da análise da Tabela 9, a hipótese nula é descartada e a hipótese alternativa é aceita uma vez que $f < F$; pode-se afirmar que os deslocamentos obtidos são dependentes da massa aplicada com um valor de confiança de 95%.

Tabela 10. Análise de variâncias (altura-deslocamento) “El Gavilán”.

<i>Origem das variações</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidade</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>f</i>
Entre grupos	19.31294	1	19.312944	9230.5	6E-41	4.1490974	0.0039943
Dentro dos grupos	0.066953	32	0.0020922				
Total	19.3799	33					

Conforme ilustrado na Figura 10, $f < F$; a hipótese nula é descartada, de forma que os deslocamentos obtidos são dependentes das alturas de queda das massas com um valor de confiança de 95%.

A decisão quanto à análise de variância dos dados obtidos nas medições de campo de ambas as pontes; pode-se afirmar que os resultados dos deslocamentos medidos dependem das massas utilizadas no impacto e suas alturas de queda livre com um nível de confiança de 95%, da mesma forma, também se afirma que são os fatores de maior influência com uma probabilidade maior que 99%.

3.6. Estimativa do fator de dano.

A partir do processamento numérico dos sinais das Figuras 8 e 9, foram obtidos os espectros de velocidade e deslocamento; Conhecendo as alturas de queda das massas, procedemos à construção dos gráficos energia cinética-deslocamento, utilizando (9) para estimar a energia cinética. As Figuras 11 e 12 mostram os gráficos de energia cinética em relação aos deslocamentos médios para os dois casos de estudo.

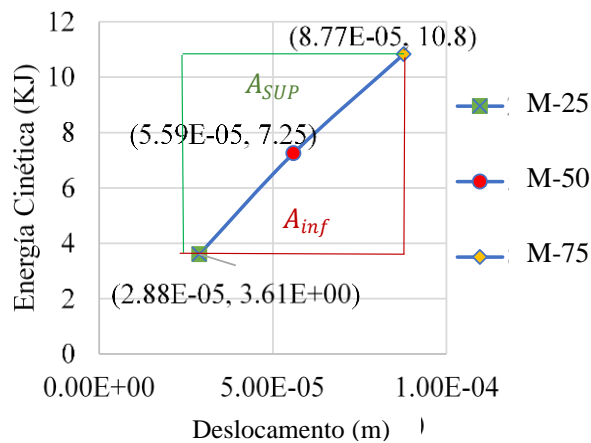


Figura 11. Relação Energia Cinética-deslocamento, ponte “El Testarazo”

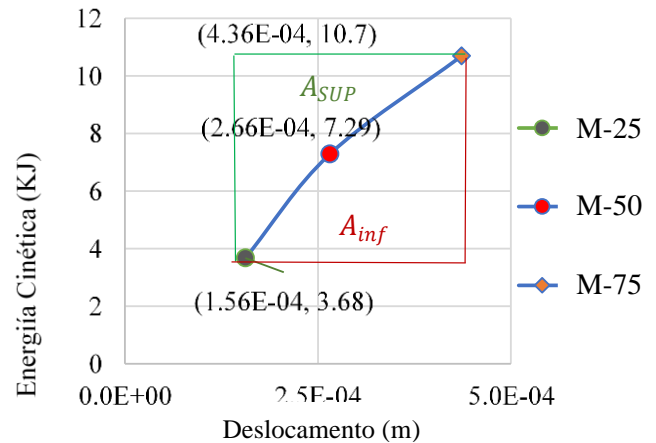


Figura 12. Relação Energia Cinética-deslocamento, ponte “El Gavilán”

Os valores obtidos para a redução por dano do momento de inércia de acordo com (10) e (11), são apresentados na tabela 11; as áreas correspondem às superfícies superior e inferior dos 3 pontos.

Tabela 11. Valores de modificação para as propriedades geométricas (I).

Ponte	“El Testarazo”	“El Gavilán”
A_{sup}	21.1165	89.50145
A_{inf}	23.0434	114.803
ΔK	0.916	0.78

4. RESULTADOS

Para obter as forças efetivas que definiram os valores da rigidez real presente em função do impacto das massas dos ensaios de campo, (11) foi aplicado.

A Tabela 12 mostra os resultados das forças e dos deslocamentos médios obtidos que serviram para obter os valores médios da rigidez real do ponto das superestruturas dos casos em estudo.

Tabela 12. Valores de forças efetivas e deslocamentos médios.

PONTE	L (m)	E (MPa)	I_{crt} (m^4)	I_D (m^4)	$\sum_{i=1}^n \delta_i$ (m)	$\overline{F_R}$ (N)
El Testarazo	12.50	23414	0.1108	0.1015	0.0000876954	5121.88
El Gavilán	32.00	23414	1.199	0.9352	0.00043612	13988.70

Com os valores médios dos deslocamentos e das forças reais obtidas, aplicando-se (12) os valores da rigidez real dos elementos em estudo foram obtidos. O contraste foi realizado com os valores obtidos do produto EI pelos cofatores invariantes de rigidez ilustrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente, para cada ponte; os resultados são apresentados na tabela 13.

Tabela 13. Valores de rigidez real, rigidez de projeto e porcentagem de dano.

PONTE	Massa (kg)	$\bar{\delta}/100$ (m)	\bar{F}_r (N)	\bar{K}_R (MN/m)	K_E (MN/m)	d_e (%)
El Testarazo	75	0.0087695 5	5121.88	58.405	66.432	12.08
El Gavilán	75	0.043612	13988.70	32.075	41.136	22.03

Avaliando o status dos estudos de caso, é importante esclarecer que o índice de danos para estruturas saudáveis deve ter um valor nulo; de acordo com a Tabela 14, que resume os resultados obtidos, afirma-se o seguinte: Para a ponte "El Testarazo" construída com lajes maciças, o valor do índice de avaria é de 12,08%, o que indica que a estrutura tem 87,9% do seu original capacidade; Pode-se interpretar que, ao longo da vida útil, a superestrutura perdeu rigidez de 12,08% em relação ao estado original, acumulando danos irreversíveis, que se manifestam (manifestação patológica) por deflexão excessiva e fissuras transversais alternadas no centro do vão.

A evidência apresentada na fig. (10), onde se pode observar que os três pontos obtidos para as diferentes massas formam duas retas com diferentes inclinações com comportamento decrescente, mostrando que o estado da estrutura ultrapassou o limite de proporcionalidade. No caso da ponte "El Gavilán" construída com vigas, lajes e diafragmas de concreto armado com desvio de 48 °, o índice de avarias resultante é de 22,03%, o que indica que tem uma capacidade de 77,97% em relação à sua capacidade projetada, que combina rachaduras e curvatura excessiva na estrutura. É importante esclarecer que a rigidez ao deslocamento vertical depende da contribuição para a flexão e torção (Deng Kai, 1998).

Sob esta consideração, o índice de dano calculado expresso na tabela 13 inclui a redução da rigidez à flexão e torção, mas não é possível distinguir qual porcentagem corresponde a cada grau de liberdade.

5. CONCLUSÕES

O uso da invariante de rigidez permitiu obter valores de índices de danos dos casos estudados de acordo com suas condições físicas. O procedimento é relativamente simples, principalmente quando se dispõe das informações utilizadas na sua construção. A facilidade na análise para obter os dados de comparação, assim como a facilidade com que os valores reais de rigidez são obtidos na atualidade, são as principais vantagens do método.

As desvantagens que existem, sobretudo, correspondem à etapa de medição em campo, uma vez que requer condições ambientais de temperatura constante e a ausência de vento. Outra desvantagem é que para pontes esconsas, uma análise mais refinada é necessária para obter a variável de rigidez, uma vez que os percentuais de redução correspondentes tanto à rigidez à flexão quanto à rigidez por torção não são apreciados com o procedimento proposto.

O método é regido por princípios energéticos, pode ser utilizado em estruturas de concreto armado e protendido com uma aproximação aceitável, pois a quantidade de energia de deformação inclui a área da região que forma as secantes com a curva força-deslocamento real e corresponde ao erro do método. Este erro é uma pequena porção do trabalho realizado que é adicionada à energia de deformação, portanto as massas de ensaio devem ser escolhidas com os menores incrementos possíveis a fim de minimizar o erro ou, na falta disso, estimar o erro logicamente ajustando os três pontos e obtenção da área dos arcos a ser subtraída da energia de deformação e adicionada ao trabalho realizado. O desenvolvimento de ajuste por engano está fora do escopo deste trabalho.

Outra limitação na utilização do método é que o peso da própria estrutura seja parte importante da carga de serviço, por isso é recomendado para uso em pontes de laje e vigas.

6. REFERÊNCIAS

- Balmes, E., Corus, M., Siegert, D. (1998). *Modeling thermal effects on bridge dynamic responses*, Ecole Centrale Paris/MSSMat, SDTools, LCPC, balmes@sdtools.com.
- Carrión Viramontes, F. J., Lozano Guzmán, A., Fabela Gallegos, M., Vázquez Vega, D., Romero Navarrete, J. A. (1999). “*Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones*”, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 132, ISSN: 0188-7297. URL: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt132.pdf>
- Crespo Sánchez, S. E., Carrión Viramontes, F., Quintana Rodríguez, J. A., Hernández Guzmán, A., López López, J. A. (2013), “*Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación MonteCarlo*”, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 379, ISSN: 0188-7297, URL: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt379.pdf>
- Deng, K. (1998), “*Dynamic response of certain types of highway bridges to moving vehicles*”, Phd. Thesis, The Doctor of Philosophy program in Civil and Environmental Engineering is a joint program with the University of Ottawa administered by The Ottawa-Carleton Institute for Civil Engineering. URL: <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp02/NQ37062.pdf>
- Singer, F. L. (1975), “*Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*”, Third Edition, Harper & Row, New York, I.S.B.N. 968-6034 16-1.
- Imhof, D. (2004). *Risk assessment of existing bridge structures*. (Doctoral thesis) University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.19092>
- Valdés, J., De la Colina, J. (2008). *Análisis de la Amplificación Dinámica de la Carga Viva en Puentes con Base en Pruebas Experimentales*. Revista Tecnológica - ESPOL, 21(1), 149 – 156. Recuperado a partir de <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/150>
- Luthe, R. (1971), “*Análisis Estructural*”, Representaciones y Servicios de Servicios de Ingeniería, S. A. México.
- Maldonado, E., Canas, J., Casas, J., Pujades, L. (1998), *Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas*, Monograph Series in Earthquake Engineering, editor A. H. Barbat. MIS27, ISBN: 84-89925-23-2, URL: https://www.scipedia.com/public/Maldonado_et_al_2019a
- Munirudrappa, N., Dhrujavara Iyengar, H. N. (1999), “*Dynamic Analysis of Continuous Span Highway bridge*”, ISET Journal of Earthquake Technology, No. 392, 36 (1), 73 – 84. URL: <http://home.iitk.ac.in/~vinaykg/Iset392.pdf>
- Park, R., Paulay, T. (1988), “*Estructuras de Concreto Reforzado*”, Editorial Limusa, S. A. de C. V. México, D. F., Cuarta reimpresión, I.S.B.N. 968-18-0100-8.
- Perdomo, M. E., Castro, L., Picón, R., Marante, M. E., Flórez-López, J. (2006). *Modelo de daño para elementos de concreto armado sometidos a corte y flexión*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 21(4), 23-36. ISSN 0798-4065.
- Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (1980), “*Puentes para Carreteras. Proyectos Tipo de Elementos de Concreto Reforzado. Parte I.*”, Cuarta colección. Diciembre de 1980, México, Editado por SAHOP.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. (1989), “*Theory of plates and Shells*”, Second edition, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, ISBN 0-07-064779-8.
- Vélez Gómez, W. H., Riveros Jerez, C. A. (2011), “*Caracterización dinámica en condiciones de excitación natural de puentes de concreto reforzado*”, Vector, 6, 36 – 44.

Verificação de Segurança à fadiga de pontes em concreto armado conforme ABNT NBR 6118, 2014.

M. D. Rossato^{1*}, G. S. Munhoz² , R. B. P. dos Santos¹, L. M. O. Scoz¹

* Autor de Contato: mateusrossato.engcivil@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.515>

Recepção: 16/09/2020 | Aceitação: 20/01/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

Nesse estudo de caso, a segurança à fadiga de uma ponte projetada em 1987 foi verificada segundo a norma vigente brasileira. Elaborou-se um modelo estrutural para determinar e verificar a seção mais crítica considerando o trem-tipo e o espectro de veículos da literatura. Segundo o método de limitação de variação de tensões, conclui-se que o concreto sujeito à compressão atende aos critérios, mas a área de aço não é suficiente para combater os esforços cortante e de flexão. Pela regra de Palmgren Miner, a vida útil à fadiga nas armaduras sujeitas à flexão é de 14,91 anos. Uma análise mais detalhada da estrutura e do espectro de veículos é necessária para reiterar tais resultados.

Palavras-chave: fadiga; ponte; regra de Palmgren-Miner; vida útil.

Citar como: Rossato, M. D., Munhoz, G. S., P. dos Santos, R. B., Scoz, L. M. (2021), "Verificação de Segurança à fadiga de pontes em concreto armado conforme ABNT NBR 6118, 2014.", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 109 – 123, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.515>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Escola do Mar, Ciência e Tecnologia, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, Itajaí, Brasil.

² Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Mateus Damo Rossato: Conceptualização, Metodologia, Escrita - Projecto Original. Guilherme da Silva Munhoz: Redação - Revisão e Edição, Visualização. Lucas Matheus de Oliveira: Validação. Análise formal. Rúbia Bernadete Pereira dos Santos: Supervisão.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Safety verification of fatigue of bridges in reinforced concrete according to ABNT NBR 6118,2014.

ABSTRACT

In this case study, the fatigue security of a bridge designed in 1987 was examined considering the current Brazilian standard. A structural model was developed to determine and verify fatigue security in the most critical section considering the Brazilian Load Model and the literature's vehicle spectrum. According to the stress variation method, it concludes that the concrete submitted to compression meets the minimum criteria, but the steel section is not enough to resist shearing and flexural stresses. Pursuant to the Palmgren-Miner rule, the fatigue service life of the reinforcement's bars under flexural stress is 14,91 years. A more detailed structural analysis of the bridge and the vehicle spectrum is necessary to confirm these results.

Keywords: fatigue; bridge; Palmgren-Miner rule; service life.

Verificación de seguridad de la fatiga de puentes en hormigón armado según ABNT NBR 6118:2014.

RESUMEN

En este estudio, se verificó la seguridad a la fatiga de un puente proyectado en 1987 según la normativa brasileña vigente. Se construyó un modelo estructural para determinar y verificar la sección más crítica considerando el modelo estándar brasileño y el espectro de vehículos en la literatura. Según el método de variación de esfuerzos, se concluye que el hormigón sometido a compresión cumple con los criterios, pero la sección de acero no es suficiente para resistir los esfuerzos cortantes y de flexión. Por la regla de Palmgren-Miner, la vida útil a la fatiga de las armaduras sometidas a flexión es de 13,91 años. Es necesario un análisis más detallado de la estructura y del espectro de carga para confirmar estos resultados.

Palabras clave: fatiga; puente; regla de Palmgren-Miner; vida útil.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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

No Brasil, o transporte de bens e pessoas acontece, majoritariamente, por meio de uma vasta malha rodoviária, com aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros de extensão. A movimentação de cargas nesse modal corresponde a 61% da matriz nacional de transportes (CNT, 2018). Nesse contexto, (Baroni, 2010) defende que as obras de arte especiais (OAEs) - pontes e viadutos - são elementos fundamentais do sistema de transportes, e assegurar sua funcionalidade, segurança e durabilidade é de suma importância.

Nas últimas décadas, a falta de políticas de manutenção e reparo das OAEs no Brasil têm contribuído para acelerar o processo de desgaste e deterioração dessas estruturas. Grande parte das pontes brasileiras foi construída entre os anos 50 e 70 e, portanto, projetadas por normas que não previam os carregamentos, nem a intensidade de tráfego existentes atualmente (Silva et.al., 2018). Os principais danos que comprometem o desempenho das OAEs estão relacionados à corrosão, ao impacto físico e à erosão de fundações. Entretanto, (Fathalla et.al., 2018) apontam que a vida útil de pontes e viadutos também está diretamente associada às variações cíclicas de tensão devido ao tráfego de veículos. (Hobbacher et.al., 2016) aponta que após um determinado número de ciclos de carga-descarga, tem-se a formação e a propagação de fissuras que podem levar ao colapso da estrutura por fadiga. (Gao et.al., 2020) estudaram a vida útil à fadiga (VUF) de pontes com estruturas mistas aço-concreto e observaram que, nesse caso, a resistência do concreto teve pouco impacto na determinação da VUF. Isso foi reiterado por (Santos, 2013), que provou que o colapso por fadiga pode acontecer com tensões inferiores ao limite elástico do conjunto aço-concreto.

A norma brasileira (ABNT NBR 6118, 2014) é utilizada para avaliar os danos em estruturas de concreto devido às ações cíclicas. Essa norma determina os critérios que devem ser adotados para a verificação do estado limite último à fadiga (método de vida ilimitada) e do estado limite de serviço. Nesse caso, a verificação à fadiga por meio da limitação de tensões é preferencialmente recomendada, fazendo o uso dos carregamentos presentes na (ABNT NBR 7188, 2013).

O carregamento proposto pela norma brasileira (ABNT NBR 7188, 2013), que aborda as cargas móveis para pontes rodoviárias e substituiu a (ABNT NBR 7188, 1984), não apresenta configurações sobre o tráfego de veículos reais, mas um carregamento hipotético, denominado trem-tipo. Além disso, é prevista uma carga uniformemente distribuída por unidade de área, visando representar a passagem de veículos leves ou multidão. Excepcionalmente, caso o espectro de cargas esteja disponível, pode-se utilizar a regra de Palmgren-Miner, que também permite determinar a vida útil da estrutura à fadiga. Segundo esse método, supõe-se que os danos à fadiga se acumulam linearmente com o número de ciclos sendo esses danos denominados, conforme (Fan e Sun, 2019), como o processo de deterioração que culmina com a redução da área resistente da seção transversal.

Esse estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a segurança à fadiga de uma ponte projetada em 1987 conforme a (ABNT NBR 6118, 2014). Foram utilizados dois métodos, limitação de variação de tensões e vida útil à fadiga. Para tal, estudou-se a situação mais crítica da estrutura – a viga longarina no meio do vão central.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. O mecanismo da fadiga na deterioração de pontes

De acordo com (Yadav e Thapa, 2020), a fadiga é um mecanismo de falha estrutural que ocorre em um material submetido a variações de tensões repetitivas, ou seja, que oscilam de forma intermitente durante um determinado intervalo de tempo. O conjunto das etapas de carga e descarga é denominado ciclo. Vários ciclos culminam com o surgimento de microfissuras ou com a propagação de microfissuras pré-existentes, podendo causar o colapso da estrutura (Cervo, 2004).

Quanto maior for a magnitude dos carregamentos intermitentes, menor será o número de ciclos necessários para romper a estrutura (BT/PCC, 2000).

As pontes e os viadutos são estruturas sujeitas ao fenômeno de fadiga pela acumulação de danos decorrentes da atuação de ciclos não uniformes de variação de tensão ocasionados pela passagem de veículos com diferentes características. A verificação desse fenômeno em estruturas de obras de arte especiais, principalmente em situações de tráfego intermitente, é essencial para garantir a segurança estrutural (Santos e Pfeil, 2014).

(Callister e William, 2008) afirmam que a ruptura por fadiga é de natureza frágil, ou seja, existe pouca (ou nenhuma) deformação plástica generalizada. De modo geral, o colapso ocorre com a propagação de fissuras, e com a superfície de fratura perpendicular à direção de aplicação da tensão. Contudo, no âmbito do concreto, o (Comité Euro-International du Béton, 1988) defende que não existe colapso exclusivamente por fadiga. Nesse caso, a ruptura das estruturas de concreto acontece devido à deterioração progressiva das fissuras causadas pelo carregamento cíclico.

Considerando as estruturas em concreto armado, (Meneghetti, 2007) comprovou que a fadiga das armaduras, normalmente, não é um fator relevante. Contudo, devido ao emprego cada vez maior de estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos e dimensionadas com base no estado de ruptura (estado limite último), é importante que os efeitos associados à fadiga sejam analisados.

2.2. Durabilidade e vida útil à fadiga

A norma (ACI 318, 2019) ressalta que a durabilidade das estruturas diz respeito à capacidade em resistir aos processos de degradação, preservando sua integridade quando exposta ao ambiente para o qual foi projetada. Nesse contexto, a norma brasileira (ABNT NBR 15575, 2013) define vida útil de projeto (VUP), como o intervalo de tempo no qual a estrutura mantém os seus requisitos de durabilidade e desempenho, atendendo aos objetivos para o qual foi proposta.

De acordo com (Branco e Paulo, 2012), uma estrutura atinge sua VUP quando são detectadas manifestações patológicas (estéticas ou estruturais) que prejudicam o seu desempenho. No entanto, há operações de manutenção que permitem restaurar a vida útil das estruturas deterioradas.

Ao contrário do termo VUP, que aborda a vida útil da estrutura como um todo, a VUF é mais restrita, e está associado especificamente ao intervalo de tempo necessário para as tensões cíclicas promoverem e propagarem a fissuração no elemento estrutural. (Baroni, 2010) defende que a VUF não culmina, necessariamente, com o colapso da estrutura, mas com fissuras em dimensões críticas que podem ser objeto indireto da falha. Dessa forma, ao longo da VUP de pontes e viadutos, o tráfego de veículos não deve promover variações excessivas de tensões que provoquem o enfraquecimento da estrutura perante à fadiga.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da ponte sobre o Rio Chapecó

A ponte sobre o Rio Chapecó foi projetada em 1987, com o objetivo de interligar as cidades de Xaxim e São Domingos, ambas no estado de Santa Catarina - Brasil. A ponte sob estudo possui 170 m de extensão total (longitudinalmente), distribuídos em 3 vãos centrais de 33,60 m, 2 vãos de 28,00 m (um para cada lado) e 2 vãos de 6,60 m, um em cada extremidade.

O tabuleiro da ponte possui uma largura total de 9,00 m, dos quais 7,20 m são destinados às faixas de rolamento, e duas faixas de 0,90 m (uma em cada bordo) são destinadas à circulação de pedestres e ciclistas. A laje do tabuleiro é apoiada sobre duas vigas longarinas (30x170 cm), seis vigas transversinas de seção 30x170 cm (uma em cada apoio), e dez vigas transversinas de seção 30x170 cm (duas em cada vão – com exceção dos vãos de extremidade). O perfil transversal do vão central da ponte é ilustrado na Figura 1A. Para a confecção das vigas foi utilizado concreto com resistência característica à compressão de 20 MPa e aço CA-50 para as armaduras.

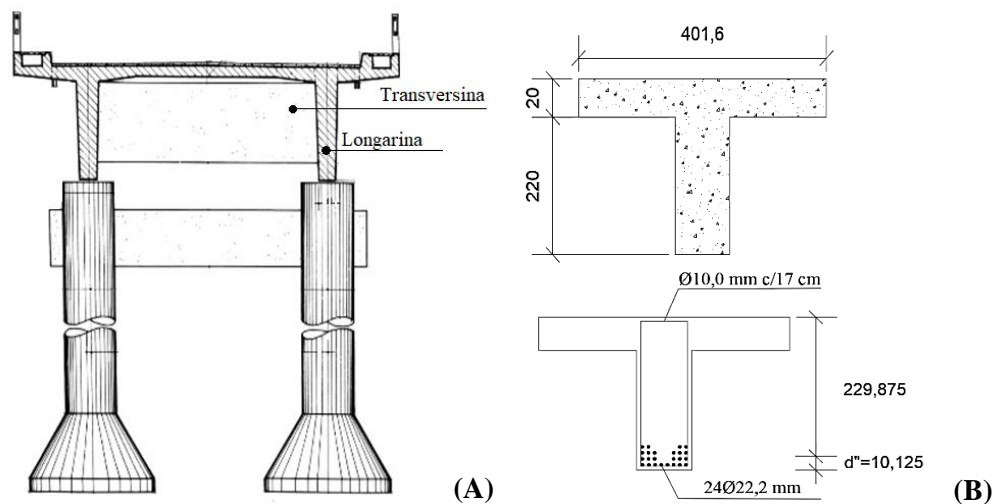


Figura 1. (A) Perfil transversal da ponte sobre o Rio Chapecó; (B) Seção transversal, em centímetros, do trecho investigado da longarina (Adaptado do Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina, 1987).

Uma análise estrutural preliminar da ponte revelou que a condição mais crítica frente à fadiga acontece no meio dos vãos centrais da ponte. Sendo assim, optou-se por determinar a VUF das longarinas presentes nessa seção (Figura 1B).

3.2. Determinação dos esforços atuantes

O modelo estrutural foi construído considerando as cargas permanentes e móveis, e os respectivos coeficientes de ponderação das cargas verticais (CPV), conforme a (ABNT NBR 7188, 2013). A determinação da linha de influência e da envoltória de solicitações foi feita por meio do software Ftool (2018), que permite a análise de estruturas no plano.

Conforme recomenda a norma brasileira (ABNT NBR 6118, 2014), para a verificação à fadiga, os esforços solicitantes no aço e concreto foram determinados no regime elástico, e o cálculo das tensões decorrentes da flexão composta, no Estádio II – desconsiderando a resistência à tração do concreto. Em relação aos momentos fletores, foi adotada a combinação de ações para o estado limite de serviço (ELS) à fadiga, indicado pela respectiva norma.

Para a determinação do momento resistente e dos demais esforços atuantes na estrutura foram utilizados as equações de equilíbrio de forças e as de (Pfeil, 1989), respectivamente. Quanto ao cálculo das tensões atuantes nas armaduras longitudinais e concreto, adotou-se as equações (1) – (2), de (Süssekind, 1980), e Equação (3) da (ABNT NBR 6118, 2014) para as armaduras transversais ($\alpha=90^\circ$).

$$\sigma_s = n * \frac{M * (d - x)}{I_{II}} \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{M * x}{I_{II}} \quad (2)$$

$$\sigma_v = \left(\frac{V_d - V_c}{0,9 * A_{sw} * d} \right) * S_w \quad (3)$$

Onde σ_s representa a tensão nas armaduras tracionadas (kN/cm^2); n é a divisão entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto; M é o momento de inércia ($\text{kN}\cdot\text{cm}$); d é a distância da face

comprimida ao centro de gravidade das armaduras tracionadas (cm); x é a linha neutra (cm); I_{II} representa a inércia equivalente no Estádio II (cm⁴); σ_c é a tensão de compressão no concreto (kN/cm²); σ_v é a tensão nas armaduras transversais ($\alpha=90^\circ$) (kN/cm²); Vd é o esforço cortante de projeto que atuará nos estribos (kN); Vc é o esforço cortante absorvido por mecanismos complementares (concreto); e, A_{sw} é a área de aço transversal necessária ao longo de 1 m (cm²/m). Uma análise estrutural revelou que o meio do maior vão da estrutura apresentava o ponto de maior variação de tensão para as armaduras sujeitas à flexão e cisalhamento, e para o concreto submetido à compressão simples. Assim, a verificação à fadiga – segundo os critérios da (ABNT NBR 6118, 2014) – foi feita sobre essa seção (condição crítica). Quanto à variação de tensão, essa é a diferença entre a máxima e a mínima tensão calculada, caso esses valores tenham sinais contrários, a diferença será entre 0 (zero) e o maior valor em módulo. No caso de pontes, essa variação de tensão será a relação entre os esforços atuantes devido às cargas permanentes com as ocasionadas pelas cargas móveis mais as cargas permanentes.

Além disso, criou-se o modelo da estrutura com os carregamentos especificados na (ABNT NBR 7188, 1984 e NB-2, 1961), a fim de comprovar que a ponte foi projetada conforme as normas vigentes na época. Isso também permitiu validar o método de cálculo da resistência das armaduras por meio das equações de equilíbrio de forças e o modelo representativo da ponte.

3.3. Verificação de segurança à fadiga

A verificação de segurança à fadiga da ponte foi feita conforme as orientações da (ABNT NBR 6118, 2014) por duas metodologias: limitação de tensões e vida útil à fadiga. Quanto à primeira metodologia, devem ser considerados a verificação pelo estado limite último (ELU) à fadiga (método de vida ilimitada) e estado limite de serviço. Neste trabalho, apenas será realizado adotando-se a estrutura no ELU.

3.3.1 Limitação de tensões

A verificação de segurança à fadiga pelo método de limitação de tensões foi feita conforme as normas vigentes para avaliar a seguridade da estrutura frente aos danos causados por ações cíclicas. A verificação de segurança seguiu as recomendações da (ABNT NBR 6118, 2014), e foi feita considerando a combinação frequente de ações, conforme a (ABNT NBR 8681, 2004). O cálculo das cargas móveis foi feito conforme o trem-tipo da (ABNT NBR 7188, 2013), posicionado no ponto mais desfavorável da estrutura.

Conforme recomenda a (ABNT NBR 6118, 2014), a verificação foi realizada no concreto sujeito à compressão e nas armaduras sujeitas à flexão e cisalhamento. A análise estrutural não identificou esforços de tração no ponto estudado, portanto, a verificação de segurança do concreto sujeito à tração foi desprezada.

3.3.2 Vida útil à fadiga

A verificação da VUF da ponte foi realizada para as armaduras sujeitas à flexão, no meio do maior vão. Esta, teve como base as orientações da (ABNT NBR 6118, 2014), que apresenta a curva S-N para as armaduras de estruturas em concreto armado. De acordo com (Bolotin, 1998), as curvas de fadiga foram introduzidas em 1860 pelo alemão August Wöhler. A curva relaciona a magnitude dos ciclos de tensão e o número de ciclos necessários para levar o material à ruptura.

Segundo a (ABNT NBR 6118, 2014), para utilizar um espectro real de cargas (ou da literatura), deve-se considerar a regra de Palmgren-Miner, que relaciona o número N (número de ciclos para romper a estrutura por fadiga, para certa variação de tensão), com o número de ciclos experimentados (n). Assim, o cálculo da VUF é dado pela Equação (4). De acordo com (ACI 215R-74, 1997; Nussbaumer et. al., 2011), os danos à fadiga devem ser acumulados de forma linear, assumindo o fim da vida útil quando o somatório for igual a 1.

$$VU = \frac{1}{D} \quad (4)$$

Onde VU representa a vida útil; e D , o dano acumulado.

Para a frequência de passagem dos veículos, adotou-se a apresentada por (Rossigali, 2013). E, quanto ao número de ciclos N (dano) do aço, este foi calculado de acordo com as Equações (5) – (6), proposta por (Bolotin, 1998) e oriunda de curvas S-N como a presente na (ABNT NBR 6118, 2014).

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \int \frac{dn}{N} \leq 1 \quad (5)$$

$$N = N_b * \left(\frac{S_b}{S} \right)^m \quad (6)$$

Onde D representa o dano acumulado; n_i é o número de ciclos aplicados no i -ésimo nível de tensão; N_i é a vida em fadiga do i -ésimo nível de tensão que corresponde ao número de ciclos até a falha nesse nível; N é o número de ciclos associados à ruptura por fadiga; N_b é uma constante adimensional que advém das curvas S-N, da Norma (ABNT NBR 6118, 2014); S_b é uma constante com unidade de tensão; S é a tensão no material; e, m é o expoente da curva de fadiga.


Todos os valores das cargas de cada veículo foram majorados pelos CPV da (ABNT NBR 7188, 2013). Por conseguinte, inseriu-se de forma individual o carregamento para as respectivas tipologias do espectro do tráfego da literatura, juntamente com o peso próprio da estrutura, determinando-se os momentos fletores máximos e mínimos no meio do maior vão.

Conforme orientação da (ABNT NBR 6118, 2014), adotou-se o índice da relação do módulo de elasticidade do aço (E_s) e do concreto (E_c) como 10; e ignorou-se o dano causado por veículos com cargas inferiores a 30 kN. Quanto à linha neutra (X_{II}) e a inércia (I_{II}) da seção no Estádio II, e a distância da face comprimida da viga ao centro de gravidade das armaduras tracionadas (d), estes serão os mesmos utilizados na verificação à fadiga por limitação de variação de tensão.

Dado que a determinação da VUF foi realizada para as armaduras à flexão da longarina, utilizou-se da Equação 1 para a determinação da tensão atuante nas mesmas devido aos carregamentos de veículos e peso próprio.

Quanto à caracterização do espectro de veículos, essa foi realizada com base na literatura com o objetivo de determinar o carregamento atuante sobre a estrutura e a VUF. Considerando a impossibilidade de realizar a medição do tráfego de veículos atual, utilizou-se a base de dados descrita por (Rossigali, 2013; Santos, 2013). Segundo os autores, o tráfego pesado de veículos comerciais pode ser representado por 27 classes com diferentes dimensões (longitudinal e transversal), diferentes distâncias entre eixos, e diferentes cargas por eixo. Um exemplo das características de uma das 27 classes estudadas (2CC) é apresentado na Tabela 1. A caracterização dos veículos pesados que trafegam no sistema rodoviário brasileiro, descrita por (Rossigali, 2013; Santos, 2013), foi feita em diferentes intervalos (1999 - 2011) e com o auxílio de diferentes administradoras de rodovias.

Tabela 1. Frequência relativa da classe de veículo 2CC, por faixa de peso.

Silhueta	Dimensões do veículo e seus eixos	Faixa de peso	Peso total (kN)	Frequência absoluta (%)	Volume (veic/dia)	Frequência relativa (%)
	2 eixos simples sendo: 1 eixo de rodas a 1,20 m da dianteira; 1 eixo de rodas duplas a 3,84 m do primeiro eixo; Balanço traseiro = 1,75 m; Largura total = 2,20 m; Distância transversal entre pneus adjacentes = 0,25 m; Bitola dos eixos (distância entre os centros de rodas) = 1,70 m.	1	18,93	0,260	15,60	2,35
		2	37,28	1,995	119,70	18,03
		3	55,62	5,490	329,40	49,61
		4	73,96	2,609	156,54	23,58
		5	92,31	0,634	38,04	5,73
		6	110,65	0,037	2,22	0,33
		7	128,99	0,022	1,32	0,20
		8	147,34	0,019	1,14	0,17

O tipo de veículo (de acordo com a classe) e o número de veículos (em cada classe) influencia diretamente na intensidade dos momentos fletores, ciclo de tensões e, conseqüentemente, no dano à fadiga. O volume de veículos em cada classe foi determinado multiplicando o volume médio diário pela frequência absoluta (em cada faixa de peso, de cada classe).

De acordo com (Rossigali, 2013), rodovias com apenas uma faixa por sentido (como é o caso da ponte sob estudo) apresentam um volume médio diário de 6 mil veículos por dia. A frequência absoluta representa o número de observações de cada faixa em relação ao número total de observações. A frequência relativa é a relação entre o volume de veículos de uma mesma classe. O total de veículos em cada classe é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Volume de veículos para cada uma das 27 classes (considerando todas as faixas).

Classe	Volume (veículos)	Classe	Volume (veículos)	Classe	Volume (veículos)	Classe	Volume (veículos)
2CC	663,96	3C3	15,30	2I3	22,26	3T4	278,40
2C	745,32	3D4	9,60	3S1	10,14	3T6	51,18
3C	1026,96	2S1	268,92	3S2	44,52	3M6	10,02
4C	8,70	2S2	718,08	3S3	368,82	2CB	477,12
2C2	89,88	2S3	681,24	3I1	12,72	3CB	122,16
2C3	16,62	2I1	8,82	3I2	7,86	3BB	122,16
3C2	17,10	2I2	106,98	3I3	95,16	-	-
Total							6000

A posição dos veículos também influencia no diagrama de tensões. Nesse trabalho, adotou-se a posição dos veículos, do espectro da literatura, no centro da faixa conforme recomendações do (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, 2005) e (Toledo, 2011). Para a construção da envoltória de esforços, as cargas devido ao tráfego foram majoradas pelos coeficientes de ponderação das cargas verticais da (ABNT NBR 7188, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades mecânicas da longarina

A largura colaborante da mesa superior, linha neutra e inércia da longarina foram determinadas no Estádio II. Com esses resultados, calculou-se o momento resistente da estrutura para que pudesse ser realizados reforços estruturais, caso ele fosse inferior ao determinado com os carregamentos da (ABNT NBR 7188, 2013).

Deste modo, dado que a largura colaborante da mesa superior é igual a 401,60 cm, linha neutra da seção no estado último (x) igual a 10,35 cm, linha neutra da seção no Estádio II (x_2) igual a 32,45 cm, tem-se que o momento de inércia (M_k) é igual a 6.512,37 kN.m e o momento resistente (I_2) igual a $4,05 \times 10^7$ cm⁴.

Considerando que a ponte foi projetada sob a (ABNT NBR 7188, 1984) (norma vigente à época do projeto), modelou-se a estrutura considerando os carregamentos permanentes, o trem-tipo de 300 kN, e o coeficiente de impacto (ϕ) de 1,23, especificado na (ABNT NBR NB-2, 1961), conforme indicado por (Pfeil, 1979). O resultado é apresentado na Figura 3.

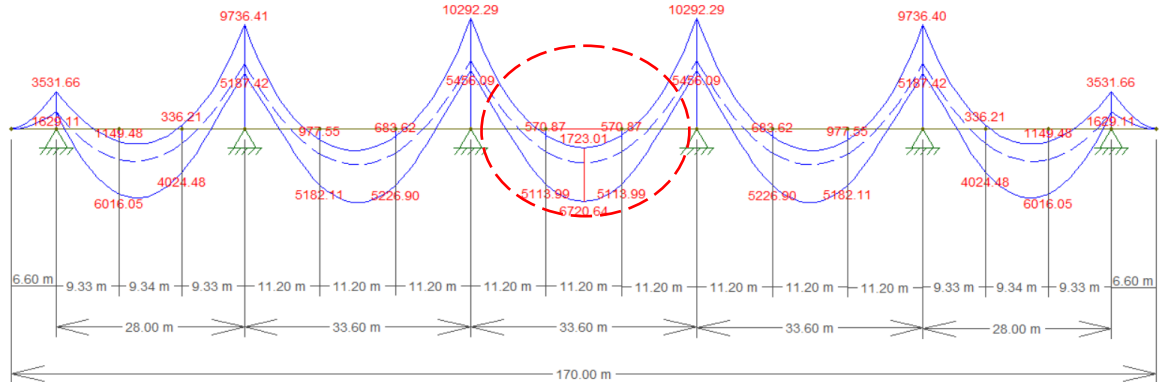


Figura 3. Envoltória de esforços devido ao trem-tipo 300 e $\phi=1,23$.

Observa-se que o valor do momento fletor no meio do vão central é de 6.720,64 kN.m, portanto, próximo do calculado por meio das equações de equilíbrio de forças, com uma diferença de apenas 208,27 kN.m ou aproximadamente 3,2 %. Desta forma, atesta-se que a ponte foi projetada conforme as normas vigentes na época (1987), valida-se a metodologia do cálculo da resistência das armaduras por meio das equações de equilíbrio de forças e o modelo representativo da estrutura da ponte.

4.2. Verificação à fadiga

Os esforços à fadiga foram determinados segundo os carregamentos da (ABNT NBR 7188, 2013). Após determinar as cargas permanentes e majorar o trem-tipo (TB-450 kN) e a carga de multidão pelos respectivos coeficientes ($CPV = 1,60$), obteve-se esforços cortantes máximos e mínimos de 467,43 kN e -467,38 kN, e momentos fletores máximo (8.904,07 kN.m) e mínimo (1.083,10 kN.m), conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5, no meio do maior vão da ponte.

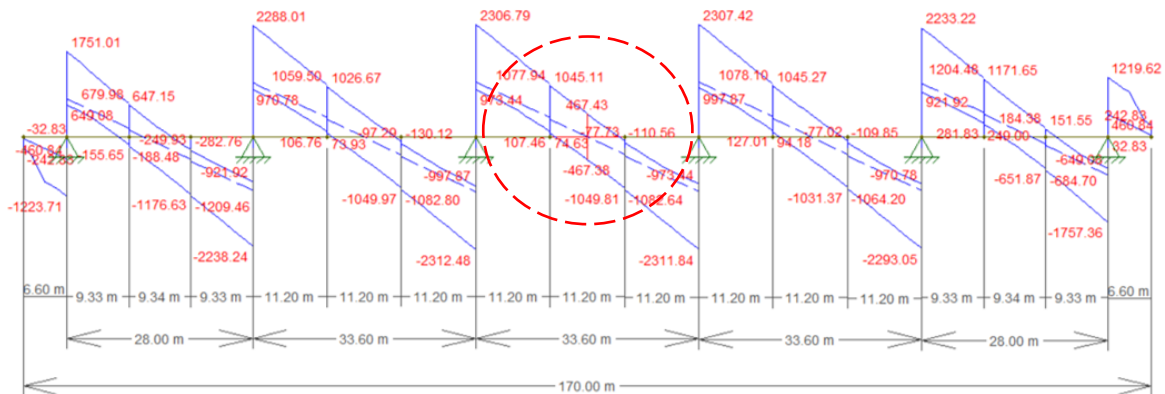


Figura 4. Envoltória de esforços cortante com TB-450 e CPV da (ABNT NBR 7188, 2013).

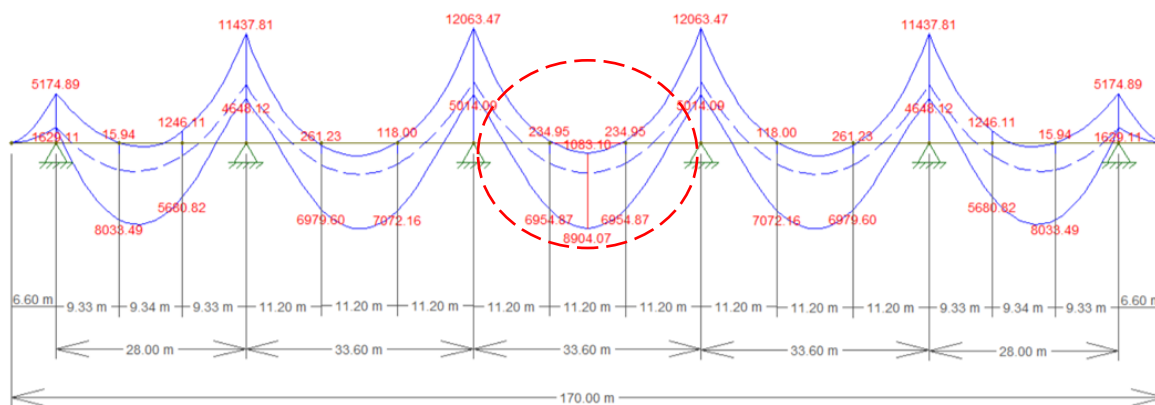


Figura 5. Envoltória de momento fletor com TB-450 e CPV da (ABNT NBR 7188, 2013).

Portanto, realizou-se a verificação à fadiga da ponte sobre o Rio Chapecó considerando as recomendações da (ABNT NBR 6118, 2014) para as armaduras sujeitas à flexão, concreto comprimido e para as armaduras de cisalhamento (estribos).

4.2.1 Armaduras à flexão

A seção da longarina verificada possui 24 barras de aço com diâmetro igual a 22,2 mm (Área de aço = 92,90 cm²). Para esse diâmetro, a (ABNT NBR 6118, 2014) recomenda que a tensão nas armaduras seja limitada a $\Delta f_{sd, fad} = 180$ MPa. Assim, considerando as propriedades mecânicas do trecho da longarina estudada, realizou-se a verificação à fadiga das armaduras à flexão no meio do maior vão da ponte sobre o Rio Chapecó, considerando os esforços do trem-tipo 450 kN e os coeficientes de ponderação das cargas verticais da (ABNT NBR 7188, 2013).

Para a determinação das tensões máximas e mínimas atuantes nas barras adotou-se a Equação 1. No trecho investigado, a variação da tensão ($\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$) foi de 190,39 MPa, ou seja, maior que o limite (180 MPa) para barras de 22,2 mm. Portanto, essa seção não é segura à fadiga.

4.2.2 Concreto à compressão

A verificação à fadiga do concreto no meio do vão da ponte foi realizada apenas à compressão, pois este será o esforço atuante neste ponto. Assim, a (ABNT NBR 6118, 2014) recomenda que esta tensão seja limitada a 45% da resistência de projeto do concreto. Além disso, a respectiva norma argumenta que as tensões determinadas deverão ser obtidas em um trecho não maior que 30 cm da face comprimida. Assim, dado que a linha neutra no Estádio II foi igual a 32,45 cm, corrigiu-se as variações de tensões por meio de semelhança de triângulos.

Para a determinação da variação de tensão, ocasionada devido aos momentos máximo e mínimo no meio do maior vão da estrutura, fez-se uso da Equação 2. A variação da tensão de compressão no ponto investigado foi igual a 3,56 MPa, menor do que o limite normativo (6,43 MPa). Deste modo, a seção do concreto sujeito à compressão encontra-se segura à fadiga.

É importante salientar que, de acordo com (Al-Khaiat e Fattuhi, 2001; Elaty, 2014), o concreto possui um ganho de resistência ao longo dos anos. Esse ganho de resistência depende de variáveis como relação água/cimento, condições de exposição (temperatura, umidade) e regime de cura. Apesar de uma maior resistência do concreto contribuir para reduzir os danos associados à fadiga, essa consideração não pôde ser incluída no presente estudo devido a limitações administrativas. Assim, optamos por fazer uma verificação assumindo a pior hipótese funcional, ou seja, mantendo a resistência do concreto constante.

4.2.3 Armaduras de cisalhamento

A seção da longarina sob investigação possui estribos de aço $\phi 10,0$ mm (Área de aço = $4,62$ cm²/m), espaçados em 17 cm. Para esse diâmetro, a (ABNT NBR 6118, 2014) recomenda que a tensão seja limitada a $\Delta f_{sd, fad} = 85$ MPa. Conforme abordado por (Pfeil, 1979), a variação de tensão de cisalhamento no meio do maior vão da ponte foi de $467,43$ kN à $-467,38$ kN. Entretanto, considera-se as tensões variando de 0 (zero) até o máximo valor, neste caso $467,43$ kN.

Para a determinação da variação de tensão nas armaduras ao cisalhamento, adotou-se a Equação 3, conforme a (ABNT NBR 6118, 2014). Quanto aos esforços, estes foram corrigidos para a combinação segundo o estado limite de serviço (ELS) à fadiga.

A variação de tensão nas armaduras para o esforço cortante (estribos) no trecho investigado da ponte foi de $122,26$ MPa. Esse valor é superior ao limite (85 MPa) para barras de $\phi 10,0$ mm, conforme (ABNT NBR 6118, 2014). Portanto, a seção sob cisalhamento não é segura à fadiga.

4.3. Dano acumulado e vida útil à fadiga








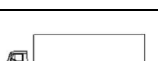

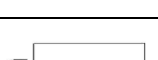
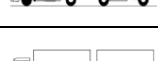
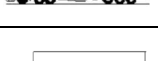
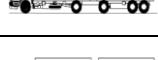

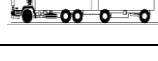
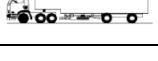
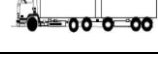
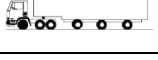

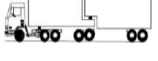



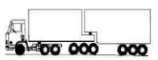




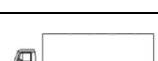
O cálculo do dano na estrutura deve considerar as tensões devido ao espectro real de veículos e à curva S-N (Curva de Wöeller), da (ABNT NBR 6118, 2014), conforme descrita pela Equação 6. O valor limite de tensão foi calculado com base nas armaduras do tipo T1, que de acordo com a (ABNT NBR 6118, 2014) possui uma curva S-N com coeficientes angulares de $k_1 = 5$ e $k_2 = 9$. O número limite de ciclos à fadiga adotado foi de $N = 1 \times 10^6$ ciclos. Esse número representa o ponto de mudança na inclinação da curva S-N. O valor limite da tensão calculada foi de $194,41$ MPa.

Para valores de variação de tensão inferiores a $194,41$ MPa, será considerado o trecho da curva com inclinação igual a 9. Para variações acima do valor limite de $N = 1 \times 10^6$, adotar-se-á inclinação igual a 5. Considerando a Equação 5 com N_b igual a 1×10^6 ciclos, S_b igual a $194,41$ MPa, expoente da curva de fadiga (m) variando entre 5 e 9 e a tensão no material (S) devido à cada faixa de peso para cada classe de veículo, determinou-se o número de ciclos N à fadiga.

Em seguida, adotando-se o volume de tráfego igual a 6.000 veic/dia ($2,19$ milhões/ano), calculou-se o dano na estrutura e o acúmulo de dano ao ano (D_{ano}), por meio da regra de Palmgren-Miner (Equação 5), ou seja, somatório da divisão entre o número de veículos da classe e faixa de peso passantes durante um ano e o número de ciclos de fadiga devido ao seu carregamento.

A vida útil da estrutura é atingida quando o somatório dos danos é igual a 1. Logo, ao calcular a diferença entre o valor unitário e o dano total nas armaduras à flexão à fadiga durante um ano, tem-se a vida útil das mesmas, em anos. A Tabela 3 apresenta o resultado do acúmulo de dano para cada classe de veículo do espectro de (Rossigali, 2013), e a VUF, considerando os coeficientes de ponderação das cargas verticais da (ABNT NBR 7188, 2013).

Tabela 3. Acúmulo de dano e vida útil à fadiga da ponte sobre o Rio Chapecó.

Classe	Silhueta	Tipo	Dano Total	Classe	Silhueta	Tipo	Dano Total
2CC		Caminhão	1,53E-08	2I3		Caminhão Trator + Semirreboque	3,18E-04
2C		Caminhão	2,97E-07	3S1		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	3,17E-07
3C		Caminhão Trucado	6,27E-05	3S2		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	4,10E-05
4C		Caminhão Simples	3,52E-06	3S3-C		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	5,44E-03
2C2		Caminhão + Reboque	2,19E-06	3S3-L		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	9,29E-03
2C3		Caminhão + Reboque	4,32E-05	3I1		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	3,71E-04
3C2		Romeu e Julieta	3,92E-05	3I2		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	1,69E-05
3C3		Romeu e Julieta	8,38E-05	3I3		Caminhão Trator Trucado+ Semirreboque	5,01E-03
3D4		Romeu e Julieta	7,47E-04	3T4		Bi Trem Articulado	2,21E-02
2S1		Romeu e Julieta	1,37E-06	3T6		Rodotrem	7,88E-03
2S2		Romeu e Julieta	3,17E-05	3M6		Caminhão Trator Trucado + Dois Semirreboques	3,04E-03
2S3-C		Romeu e Julieta	6,63E-03	2CB		Ônibus	1,35E-06
2S3-L		Romeu e Julieta	5,75E-03	3CB		Ônibus Trucado Misto	9,88E-06
2I1		Romeu e Julieta	1,55E-04	3BB		Ônibus Trucado Misto	9,88E-06
2I2		Caminhão Trator + Semirreboque	2,15E-05	Σ soma			6,71E-02

Portanto, a vida útil da ponte sobre o Rio Chapecó, considerando o tráfego de veículos de Rossigali (2013) majorados pelos coeficientes de impacto da (ABNT NBR 7188, 2013), é igual a 14,91 anos, com um dano total acumulado de 6,71E-02 (unidade).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar se uma ponte projetada em 1987, conforme as normas vigentes à época (ABNT NBR NB-2, 1961; ABNT 7188, 1984) ainda apresenta segurança à fadiga segundo as normas vigentes atuais (ABNT NBR 7188, 2013; ABNT NBR 6118, 2014). Para tal, estudou-se a situação mais crítica da estrutura – a viga longarina no meio do vão central. Com o desenvolvimento da presente pesquisa foi possível concluir que:

- Na verificação à fadiga das armaduras longitudinais sujeitas à flexão simples, considerando as cargas da (ABNT NBR 7188, 2013), a tensão atuante foi de 190,39 MPa, ou seja, acima do limite especificado pela norma, (180 MPa). Em relação às armaduras transversais, a tensão atuante foi de, aproximadamente, 44 % superior ao limite especificado em norma, também não atendendo aos critérios de segurança à fadiga;
- Na verificação do concreto à compressão, considerando as cargas da (ABNT NBR 7188, 2013), o trecho investigado provou-se seguro, com uma tensão atuante de 3,56 MPa, abaixo do limite de 6,43 MPa. Dessa forma, pode-se concluir que caso a fadiga ocorresse na estrutura, ela aconteceria inicialmente nos estribos, e não no concreto;
- A VUF, devido ao tráfego de veículos reais do espectro de (Rossigali, 2013) e coeficientes majoradores das cargas dinâmicas da (ABNT NBR 7188, 2013), foi de 14,91 anos. Isso, pois os carregamentos vigentes considerados resultaram em tensões muito superiores ao limite à fadiga das armaduras à flexão;
- Após os cálculos de verificação à fadiga pelo método de limitação de tensões e pelo acúmulo de danos, concluiu-se que as armaduras à flexão e os estribos da ponte sobre o Rio Chapecó, não atenderam a verificação à fadiga, apenas o concreto à compressão, considerando o carregamento da (ABNT NBR 7188, 2013). No caso do espectro de veículos reais, as armaduras à flexão não atenderam aos critérios de segurança da regra de Palmgren-Miner (acúmulo de danos).

É importante salientar que apesar das análises terem sido feitas sobre um caso real, as características das cargas (veículos, tráfego) não representam, necessariamente, as reais condições de tráfego sob o qual a ponte está sujeita. Dessa forma, a medição das características dos veículos e do tráfego *in situ* poderia resultar em idades diferentes de VUF.

Além disso, recomenda-se que um estudo minucioso dos elementos da estrutura seja realizado para uma completa verificação à fadiga, visto que alguns destes estão sujeitos a variações de tensão ao longo de sua extensão. Com isso, uma avaliação global do desempenho poderá ser obtida.

6. REFERÊNCIAS

- Al-Khaiat H., Fattuhi, N. (2001), *Long-term strength development of concrete in arid conditions*. Cement and Concrete Composites. 23(4-5)363-373. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00004-X)
- American Concrete Institute, ACI (1997), “*ACI 215R-2: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading*”. Michigan, Estados Unidos.
- American Concrete Institute, ACI (2019). “*ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete*”. Michigan, Estados Unidos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1961). *NB-2: Cálculo e Execução de Pontes de Concreto Armado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Baroni, H. J. M. (2010), “*Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados*”, Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bolotin, V. V. (1998), Introduction. In: Bolotin V. V. “*Mechanics of Fatigue*”, Boca Raton, CRC Press LLC, cap. 1, pp. 01-17.
- Branco, F., Paulo, P. (2012), *O projecto de pontes para vidas superiores a 100 anos*. Revista ALCONPAT. 2(1):1-9. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i1.20>
- Callister J., William D. (2008), “*Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*”. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, p. 620. Tradução: Soares, S. M. S.
- Cervo, T. C. (2004), “*Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação*”, Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Confederação Nacional de Transporte, CNT (2018), “*Pesquisa CNT de rodovias 2018: Relatório gerencial*”. Brasília, Brasil.
- Comité Euro-International du Béton, CEB (1988), “*Fatigue of Concrete Structures. Bulletin d’Information N.º 188*”. Dubrovnik, Croácia.
- Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina, DER (1987), “*Projeto da Ponte sobre o Rio Chapecó na rodovia SC 451, entre os municípios de Xaxim e São Domingos*”. Florianópolis, Brasil.
- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, DNIT (2005), “*Manual de Conservação Rodoviária*”. Rio de Janeiro, Brasil.
- Elaty, M. A. A. A. (2014), *Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model*. HBRC Journal. 10(2)145-155. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.09.005>
- Fan, Z., Sun, Y. (2019), *Detecting and evaluation of fatigue damage in concrete with industrial computed tomography technology*. Construction and Building Materials. 223:794-805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.016>
- Fathalla, E., Tanaka, Y., Maekawa, K. (2018), *Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks*. Engineering Structures. 171:602-616. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.122>
- Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC (2000), “*Concreto com Fibras de Aço - Boletim Técnico PCC/260*”. São Paulo, Brasil.
- Ftool (2018), “*A Graphical-Interactive Program for Teaching Structural Behavior*”. Available in: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Access in 15 Mar. 2018.
- Gao, Q., Dong, Z., Cui, K., Liu, C., Liu, Y. (2020), *Fatigue performance of profiled steel sheeting–concrete bridge decks subjected to vehicular loads*. Engineering Structures. 213:110558. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110558>
- Hobbacher, A. F., Hicks, S. J., Karpenko, M., Franz, T., UY, B. (2016), *Transfer of Australasian bridge design to fatigue verification system of Eurocode 3*. Journal of Constructional Steel Research. 122:532-542. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.023>
- Meneghetti, L. C. (2007), “*Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida*”, Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Nussbaumer, A., Borges, L., Davaine, L. (2011), “*Fatigue design of steel and composite structures*”. Wiley, Hoboken, Estados Unidos, p. 167.
- Pfeil, W. (1979), “*Pontes em concreto armado: Elementos de projeto, solicitações, dimensionamento*”. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, p. 433.
- Pfeil, W. (1989), “*Concreto armado*”. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, p. 812.
- Rossigali, C. E. (2013), “*Atualização do modelo de cargas móveis para pontes rodoviárias de pequenos vãos no Brasil*”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Santos, L. A., Pfeil, M. S. (2014), “*Desenvolvimento de modelo de cargas móveis para verificação de fadiga em pontes rodoviárias*”. Engenharia Estudo e Pesquisa ABPE 14(1):40-47.
- Santos, L. F. (2013), “*Desenvolvimento de um modelo de cargas móveis para verificação de fadiga em pontes rodoviárias*”, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Silva, C. J. G., Monteiro, E. C. B., Vitória, J. P. A. (2018), “*Condições estruturais e funcionais de pontes e viadutos das rodovias federais de Pernambuco*”. Revista ALCONPAT. 8(1)79–93. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.199>
- Süssekind, J. C. (1980), “*Curso de Concreto: Concreto Armado - Volume P*”. Globo, Porto Alegre, Brasil, p. 376.
- Toledo, R. L. S. (2011), “*Avaliação de vida útil à fadiga em ponte mista aço-concreto considerando o espectro de veículos reais*”, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Yadav, I. N., Thapa, K. B. (2020), “*Fatigue damage model of concrete materials*”. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 108:102578. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102578>

Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado. Investigação documental

C. S. Silva^{1*} , E. C. B. Monteiro^{1,2} , M. S. C. Santos³ , T. W. C. O. Andrade⁴ ,
W. A. Soares⁶ , D. C. M. Neves⁶ 

* Autor de Contato: cristiane_santana@msn.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.490>

Recepção: 20/05/2020 | Aceitação: 10/03/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

A Reação Álcali Agregado (RAA) atingiu muitas fundações e observou-se a importância de realizar uma verificação nos procedimentos de recuperações, compreendendo uma investigação em cinquenta fundações, objetivando traçar um perfil dos processos de recuperações através de consulta no acervo de empresas fiscalizadoras ou executoras de recuperações na cidade de Recife e cidades vizinhas. A metodologia consistiu na aplicação de um questionário com dezessete perguntas. Esses resultados possibilitaram estabelecer as semelhanças das fundações afetadas, o diagnóstico, processos aplicados na recuperação, os avanços dos materiais, fatores condicionantes para utilização da armadura, os custos, e possibilitaram a identificar as fundações que deixaram uma janela de inspeção para posteriores verificações. Concluindo-se com os resultados uma avaliação dos tratamentos nas fundações acometidas pela reação RAA.

Palavras-chave: fundações; reação álcali agregado, diagnóstico, procedimentos, recuperações.

Citar como: Silva, C. S., Monteiro, E. C. B., Santos, M. S. C., Andrade, T. W. C. O., Soares, W. A., Neves, D. C. M. (2021), "*Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado. Investigação documental*", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 124 – 145, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.490>

¹ Department of Civil Engineering, Catholic University of Pernambuco, Recife-PE, Brazil.

² Department of Civil Engineering, University of Pernambuco, Recife-PE, Brazil.

³ Department of Civil Engineering, Federal University of Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil.

⁴ Department of Civil Engineering, Federal University of Pernambuco, Recife-PE, Brazil.

⁵ Department of Civil Engineering, Pernambuco University, Recife-PE, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho os autores E.C.B. e T.W.C.O. contribuíram com a ideia original, supervisão e as diretrizes deste artigo. Os participantes M. S. C., W. A. e D. C. M., com a pesquisa do conteúdo da investigação, desenvolvimento, no contato com as empresas para coleta dos dados, na formatação das conclusões do trabalho e nas traduções em Inglês e Espanhol.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Recovery procedures for foundation elements with alkali/aggregate reaction problems. Documental research

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction (AAR) is a problem that has affected numerous foundations. This study, through an investigation of fifty foundations, seeks to create a profile of the recovery processes through consultations with inspection companies that have carried out recoveries in the city of Recife and neighboring areas. The methodology consisted on the application of a survey with seventeen questions. The results obtained made possible to establish similarities in the foundations affected, the diagnoses, processes applied during recovery, advances in materials, conditioning factors for the use of the reinforcement, and costs, and also identified the foundations where an inspection window was left for future checks. The results conclude with an evaluation of the treatments for foundations affected by AAR.

Keywords: foundations; alkali-aggregate reaction; diagnosis; procedures; recovery.

Procedimientos de recuperación en fundaciones por problemas de reacción álcali/agregado. Investigación documental

RESUMEN

La reacción álcali/agregado (AAR) ha afectado muchas cimentaciones lo cual señala la importancia de realizar una verificación de los procedimientos de recuperación, la cual se realizó en cincuenta cimentaciones. El objetivo fue construir un perfil de los procesos de recuperación a través de una consulta con empresas de inspección o ejecutores de recuperaciones en la ciudad de Recife y ciudades vecinas. Para ello se aplicó en forma metodológica un cuestionario con diecisiete preguntas. Estos resultados permitieron establecer las similitudes de las cimentaciones afectadas, el diagnóstico, los procesos aplicados en la recuperación, los avances en materiales, los condicionantes para el uso de la armadura, los costos, y permitieron identificar las cimentaciones que dejaron una ventana de inspección para controles adicionales. El resultado fue una evaluación de los tratamientos en las bases afectadas por la reacción química AAR.

Palabras clave: fundaciones; reacción alcalina agregada; diagnóstico; procedimientos; recuperaciones.

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 para o uso exclusivo do título da revista 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

No início da década de quarenta, a comunidade científica deparou-se com uma “doença” que acometeu as grandes estruturas de concreto. Uma reação lenta e progressiva que se desenvolvia através de um processo químico entre os hidróxidos alcalinos, presentes nas soluções existentes nos poros da pasta do concreto e alguns minerais reativos encontrados em certos tipos de agregados, em presença da água. A Reação Álcali Agregado, mais conhecida como RAA, é uma reação química de longa duração e deletéria, que podia resultar na formação de um gel expansivo, induzindo o elemento de concreto à formação de fissuras e lascas, e como consequência a perda de sua durabilidade e outras propriedades.

No Brasil, os pioneiros estudiosos acerca da reação foram Heraldo de Souza Githay e Murilo Dondici Ruiz, em 1963, através do instituto de Pesquisas Tecnológicas em São Paulo (IPT), relataram as reações da RAA, seu comportamento, os materiais envolvidos e ações mitigadoras, destinadas as Centrais Elétricas de Urupungá.

A pesar de todas as descobertas científicas e o firme propósito de aprimorar e consolidar os estudos sobre o concreto, os problemas relacionados ao envelhecimento das estruturas, atrelados à falta de manutenção e ao incipiente conhecimento de algumas patologias, a exemplo da Reação Álcali Agregado (RAA), responsáveis por vultuosas somas em suas recuperações, vêm trazendo muitas incertezas sobre os resultados e a durabilidade destas intervenções.

A constatação da Reação Álcali Agregado em obras de edifícios foi verificada pela primeira vez na Região Metropolitana do Recife (RMR), estado de Pernambuco, devido ao interesse gerado na inspeção das fundações de diversos edifícios habitacionais, após a queda do Areia Branca em 2004. Cumpre esclarecer que as causas do desabamento do Edifício Areia Branca foram devidamente apuradas e nada se constatou que pudesse apontar a RAA como causa do episódio. No entanto, a inspeção das fundações de diversos edifícios naquela região, permitiu a verificação e constatação da existência de muitos casos onde houve fissuração dos blocos de coroamento sobre estacas ou de sapatas. A análise apurada dessas ocorrências por especialistas, a partir de testemunhos de concreto extraídos dos elementos de fundação, mostrou realmente tratar-se de Reação Álcali Agregado, tendo, por exemplo, os laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) estudado mais de 60 casos (Battagin, 2016).

De acordo com Otoch (2016), a ocorrência da expansão por RAA, até anos atrás, era de principal incidência em obras de grande porte, como barragens e partes de usinas hidrelétricas. Mais recentemente, no fim do ano de 2014 e ao longo de todo o ano de 2015 foram constatados vários casos de RAA na região de Recife/PE, principalmente em blocos e sapatas de fundações de edifícios com idades de 3 a 20 anos de construção. Pouco tempo depois em Fortaleza/CE, também surgiram os primeiros casos de RAA em blocos de fundações em algumas edificações, conforme já mencionado. (Otoch, 2016).

Segundo Battagin (2016) através dos trabalhos de divulgação do IBRACON e de normalização sobre o número de ensaios efetuados nos laboratórios da ABCP, na ausência de estatística dos demais laboratórios, constatou-se que em todo o País o número de ensaios enviados para ABCP aumentou consideravelmente através de vários seguimentos da cadeia construtiva. As amostras de agregados foram enviadas pelos mais diferentes segmentos, incluindo fornecedores de agregados (pedreiras), empresas de serviços de concretagem, construtoras, projetistas, universidades, além de outros laboratórios, mostrando que toda a cadeia da construção civil foi aos poucos se conscientizando da importância da prevenção de manifestações patológicas ligadas à RAA. A partir de 1621 amostras de agregado miúdo e graúdo recebidas pelos laboratórios da ABCP, nas quais havia suficiente identificação que permitisse sua rastreabilidade quanto ao tipo de cliente final ou procedência de unidade da Federação, foi possível levantar o perfil dos clientes solicitantes dos ensaios e a procedência das amostras de agregado por estados brasileiros, visualizados na Figura

1. A maior parte vem de São Paulo com 532 amostras e Pernambuco com 228 amostras, com registros de solicitações de todos estados brasileiros, exceto Acre. (Battagin, 2016). Diante deste cenário encontrado em Recife e cidades vizinhas em Pernambuco e por trata-se de regiões com grande incidência dessa reação, constatados com o grande aumento de ensaios buscando elucidar as condições do agregado, o presente trabalho, apresenta o resultado de uma investigação documental executada nas principais empresas de recuperação de estrutura na RMR. Com o propósito de traçar um perfil historiando as características construtivas do empreendimento, como foi feito o diagnóstico, os procedimentos utilizados na intervenção, materiais aplicados nas recuperações, a utilização do encamisamento com a armadura e os custos, assim como foram identificadas as fundações que após a recuperação deixaram uma janela de inspeção. A entrevista forneceu dados de cinquenta fundações afetadas pela reação, porém esse número possivelmente é superior, que poderá ser posteriormente pesquisado buscando uma abrangência maior com dados relevantes que possam somar-se e trazer resultados futuros.

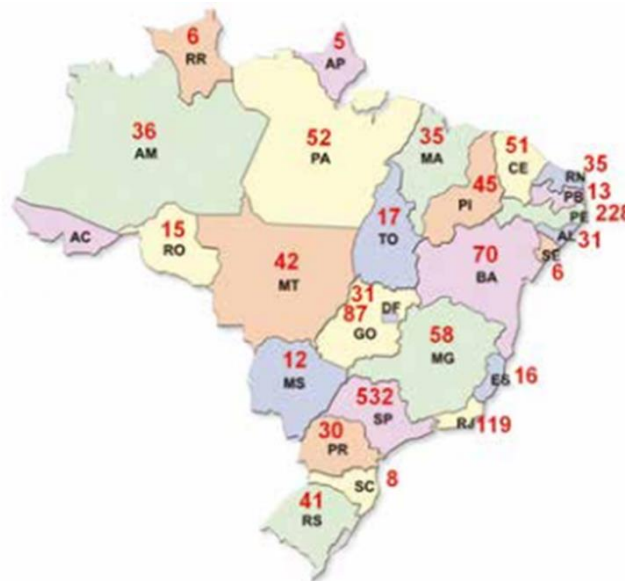


Figura 1. Distribuição de amostras por Estados (Battagin, 2016).

1.1 Conceito da reação e seus tipos

A reação álcali agregado trata-se de uma reação química que ocorre na estrutura interna do concreto envolvendo os alcalinos hidróxidos vindos como consequência da hidratação do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. O resultado da reação, são produzidos produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar ao comprometimento das estruturas de concreto. Existem dois tipos de reação álcali agregado, classificadas de acordo com a sua composição mineralógica reativa do agregado e com mecanismos de expansão específicos. A reação recebe as seguintes denominações: reação Álcali Sílica (RAS) ou Álcali Silicato (RASS) e Álcali Carbonato (RAC).

1.1.1 Reação Álcali Sílica (RAS)

Segundo Hasparyk (2005), a reação Álcali-Sílica é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, como sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas minerais mais comuns destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo microcristalino/ criptocristalino e deformado.

1.1.2 Reação Álcali Silicato (RASS)

Um tipo específico da reação Álcali Sílica, denominada de reação Álcali Silicato, se processa entre álcalis e silicatos reativos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas. Apresenta o mesmo mecanismo que a reação álcali-sílica, porém ocorre mais lentamente. (Andrade, Silva, 2006).

1.1.3 Reação Álcali Carbonato (RAC)

É uma reação mais rara e não há a formação do gel. Caracteriza-se pela expansão das rochas carbonáticas, em consequência da reação entre álcalis, proveniente principalmente da pasta do cimento e o calcário dolomítico, gerando compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato de cálcio e silicato magnésiano. Atribui-se a esta expansão, denominada de desdolomitização, a causa das fissuras que surgem no concreto em consequência do enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Nesta reação ocorre novamente a formação de álcalis, possibilitando a continuidade da desdolomitização, até que a dolomita tenha reagido por completo ou até que a concentração de álcalis seja suficientemente reduzida. (Andrade, Silva, 2006).

1.2 Comportamento das estruturas afetadas

Os sintomas de uma estrutura com a RAA se apresentam através do aparecimento da exsudação do gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo, fissuração e descoloração do concreto. As fissuras que tiverem sua configuração em mapa ocorrem com maior frequência em pavimentos rodoviários, pistas de aeroportos, muros e faces de elementos estruturais, que apresentam baixa restrição à expansão nas três direções. Segundo Hasparyk (2005), os principais efeitos deletérios provocados pela RAA em uma estrutura, são os seguintes: fissuração na superfície do concreto e entre camadas de concretagem; deslocamento na superfície do concreto; perda de estanqueidade; deslocamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados; movimentação (abertura ou deslocamento relativo) de juntas de contração; abertura de juntas de construção, com fissuras horizontais; movimentação/desalinhamento das superfícies livres (alteamento da crista da barragem e soleiras de vertedouros, deflexões para o montante nas estruturas de barragens e outros) e travamento ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, entre outros).

2. METODOLOGIA

2.1 Considerações iniciais

A pesquisa desenvolvida para este trabalho reporta-se a uma investigação documental, desenvolvida nas cidades de Recife e Jaboatão dos Guararapes, locais onde ocorreu a maior quantidade de fundações assoladas pela reação Álcali Agregado, descritas nesta pesquisa. No Brasil até a presente data, todos os casos relatados da reação são exclusivamente do tipo Álcali Sílica (RAS), como será apresentada nas etapas que se seguem. Neste trabalho, serão expostas as características das edificações, diagnósticos, procedimentos, custos e os resultados dessa investigação obtidos através de consultas dos arquivos de empresas, assim como entrevistas que foram feitas junto aos engenheiros com atuação na área de recuperações, em cinquenta casos de fundações afetadas pela reação.

Vale ressaltar que não houve problemas e nem restrições por parte das empresas envolvidas no fornecimento das informações, mas se constatou um número pequeno do histórico de empreendimentos com fundações recuperadas. O que se remete ao fato de os condomínios fazerem seus orçamentos com empresas com experiências comprovadas e estas, ao emitirem seus pareceres com os materiais necessários para sanar os danos impostos pela reação deletéria, são dispensadas.

Com o passar do tempo verifica-se que estas recuperações foram executadas por pessoas com habilidades “duvidosas”, podendo comprometer a eficiência dos serviços prestados. Partindo-se desse princípio essas fundações deixam de ser analisadas e por consequência os resultados destas recuperações possivelmente podem terminar em insucessos, em função de processos mal executados.

Apesar da reação ser conhecida há mais de 85 anos pelo meio técnico e suas formas de prevenção serem também bem difundidas, a deterioração do concreto resultante da reação ainda é considerada relevante, notadamente pela sua grave repercussão nas fundações e pelos grandes transtornos trazidos às obras de infraestrutura e de edificação.

Baseado neste contexto e como Recife é possivelmente está dentre as cidades com o maior número de casos da reação registrados na literatura Brasileira fez-se uma investigação para coleta de dados sobre o tema, iniciada em dezembro de 2018 e finalizada em julho 2019. A metodologia usada dividiu-se em quatro etapas conforme a Figura 2. A metodologia desenvolvida foi baseada em entrevistas no maior número possível de empresas que executaram recuperações em fundações afetadas pela Reação Álcali Agregado, através da aplicação de um questionário com 17 perguntas, conforme Tabela 1.



Figura 2. Metodologia aplicada nas empresas entrevistadas.

2.2 Transcrição das Entrevistas

A primeira etapa desenvolvida fora as entrevistas com as empresas da cadeia construtiva, informando sobre o propósito da pesquisa e sobre a necessidade de dados atualizados quanto às fundações que foram recuperadas.

Tabela 1. Questionário aplicado nas entrevistas.

Empreendimento:		
1.0	Características da edificação:	
1.1	Qual a finalidade do empreendimento?	
	Residencial	Comercial
1.2	Quantos pavimentos?	
1.3	Qual altura do nível do lençol freático?	
1.4	Qual a idade da edificação?	
1.5	Como descobriu o problema?, Quíás os sintomas encontrado?	
1.6	Qual a distância do mar para edificação?	
1.7	Qual o tipo de fundação da edificação?	
2.0	Como foi feito o diagnóstico?	
2.1	Local da incidência das fissuras na edificação:	
2.2	Como foi diagnosticada a patologia?	
2.3	Quais os ensaios que foram executados para determinar a patologia?	
3.0	Como foi feita a recuperação?	
3.1	Quais as etapas que foram seguidas?	
3.2	Como foi feito o preenchimento das fissuras?, Quais os equipamentos utilizados na recuperação?	
3.3	O projeto de reforço foi elaborado pelo Caculista	
3.4	Foi feito encamisamento?	
	Sim	Não
3.5	Foi feito impermeabilização?	
4.0	Quem foram os responsáveis pelos custos da recuperação?	
4.1	Quem foi o responsável pelo pagamento?	
4.2	Foi deixada uma janela de inspeção após a recuperação?	
5.0	Observações:	

2.3 Coleta de Dados

Para esta pesquisa foram cadastradas informações de cinquenta edificações, comerciais e residenciais com fundações recuperadas.

Na cidade de Recife as recuperações foram em edifícios localizados nos Bairros das Graças, Casa Forte, Espinheiro, Derby, Boa Vista, Madalena, Boa Viagem, Setúbal, com ênfase para o Bairro de Boa Viagem.

Na cidade de Jaboatão dos Guararapes as recuperações foram em edifício localizado no Bairro de Piedade.

As empresas que participaram desde universo de informações foram bastante receptivas e forneceram os elementos necessários, partindo-se do princípio que a identidade dos edifícios elencados ficaria sob sigilo da pesquisa, assim como a identidade das empresas. Desta forma, cada empresa foi nomeada por uma letra, aleatória a seu nome. Foram verificados nos acervos os trabalhos de recuperações executados após 2004, período pelo qual as recuperações se intensificaram, a Tabela 2 tem o levantamento geral das empresas consultadas, demonstrando sua atuação e o total de fundações detectadas.

A primeira empresa entrevistada A. Engenharia Ltda.

Fundada em 1995, empresa A é uma empresa que atua no campo da construção civil, especializada na área de recuperação e reforço de estruturas em concreto armado e protendido. Com um acervo de mais de 600 obras concluídas, 24 anos no mercado, conferindo em seu portfólio a excelência em construções de estruturas em ambientes marinhos, tratamento de concretos aparentes, recuperação e reforço de adutoras, reforço estrutural, entre outros.

Nesta empresa catalogou-se no período de dezembro 2018 e maio de 2019 trinta edificações, com quadro da reação identificada.

A segunda empresa a X Engenharia.

Criada em 1981, possui em seu portfólio de construção uma variada gama de edificações modernas, passando por estruturas portuárias, empreendimentos imobiliários, obras de arte especiais, recuperação e reforço estrutural em edifícios e obras de arte e conservação e restauração de Patrimônio Histórico.

Nesta empresa catalogaram-se três edificações, com quadro da reação identificado, incluindo a recuperação de um edifício comercial. Porém as demais recuperações executadas pela empresa em questão fogem da proposta deste trabalho, que apesar de tratar-se da recuperação de fundações com RAS, não se trata de construções residenciais ou comerciais.

A terceira empresa foi Y Engenharia.

Constituída em abril de 2000, tendo como objetivo a prestação de serviços técnicos especializados no setor da construção civil, englobando restauração e reforços em elementos estruturais de concreto armado, sendo este o destaque de suas atividades. Os serviços especializados de restauração e reforço estrutural tornam delicada a divulgação nominal das obras que constituem seu acervo técnico, que consta aproximadamente 350 trabalhos executados. Nesta empresa catalogaram-se sete edificações que passaram pelo processo de recuperação.

A quarta empresa foi a Z. Engenharia.

Com mais de 12 anos de existência e experiência, exercendo atividades de prestação de serviços técnicos de engenharia civil nas áreas de recuperação e manutenção de edificações. Nesta empresa catalogaram-se três edificações, com quadro da reação identificado.

A quinta empresa T Engenharia.

Fundada em janeiro de 2003 na cidade do Recife, hoje possui atuação nacional e em sua carteira mais de 500 clientes atendidos. Os serviços oferecidos na área de assistência técnica pericial, consultorias, gerenciamento e fiscalização das obras, laudos periciais, monitoramento e acompanhamento técnico, entre outros. Nesta empresa catalogaram-se sete edificações, com quadro da reação identificado.

Tabela 2. Empresas participantes das entrevistas.

Empresa	Atuação	Experiência	Tempo Experiencia	Número de casos
A	Recuperação de estrutura	Estruturas marinhas, tratamentos de concretos, recuperação e reforço.	24 anos	30
X	Recuperação de estrutura	Estruturas portuárias, obras de arte especiais, recuperação y reforço e restaurações.	38 anos	03
Y	Recuperação de estrutura	Recuperação y reforço de fundações.	19 anos	07
Z	Recuperação de estrutura	Recuperação y reforço de fundações y manutenções prediais.	12 anos	03
T	Acompanhamento da recuperação	Assistência técnica pericial, consultorias, laudos e monitoramento e acompanhamento técnico.	16 anos	07
TOTAIS				50

2.4 Aplicação do questionário

A terceira etapa correspondeu à aplicação de um questionário de quinze perguntas relativas a edificações comerciais e residenciais onde a patologia da RAS estava comprovada e recuperada. Na aplicação do questionário, demonstrado na Tabela 2, buscaram-se informações sobre a manifestação patológica, historiando as características do empreendimento, como foi determinado o diagnóstico, o processo de recuperação e os custos.

2.5 Verificação dos dados

Com os dados coletados iniciou-se a quarta etapa referente à análise de todo material adquirido na pesquisa, buscando-se fotos, relatos e resultados de ensaios para contribuição do material pesquisado.

Com as respostas de cada questionário, de cada empresa, foi construída uma planilha com as composições de cada empreendimento com as suas referências, nomeando-se e suas características descritas, como as idades, tipo de recuperações, materiais utilizados nos enchimentos, tipos de ensaios, ano de recuperação etc. verificado através da Tabela 3. Estes dados foram somados e depois obtidos os percentuais de cada item analisado. De posse destes resultados criaram-se os gráficos (Figuras) com suas respectivas identificações.

Tabela 3. Planilha com as composições.

PLANILHA DE COMPOSIÇÕES																	
EMPRESA X	REFERÊNCIAS	CARACTERÍSTICAS						DIAGNÓSTICO			RECUPERAÇÃO			VALORES		INSPEÇÃO	
		FINALIDADE	Nº PAV	NÍVEL LENÇOL	IDADE	SINTOMAS	FUNDAÇÃO	LOCAL	PATOLOGIA	ENSAIOS	ETAPAS	CALCULISTA	ENCAMISAMENTO	CONDOMÍNIO	CONSTRUTORA	SIM	NÃO

2.6 Discussões

Por fim, verificou-se todo o material colhido, tendo-se os subsídios para analisar as características do empreendimento, procedimento aplicado na determinação da manifestação patológica,

diagnóstico, processo de recuperação e os custos.

Constatou-se que as intervenções nas fundações ocorreram em função da necessidade de verificar qual o estado em que se encontravam. Acredita-se que essas investigações ocorreram devido a dois fatores preponderantes. O primeiro em função do colapso do edifício Areia Branca que colocou os condôminos em estado de alerta para verificações de suas estruturas e o segundo da obrigatoriedade impostas pela Lei Nº 13341. Esta Lei tornou obrigatória as inspeções periódicas, identificando assim, um maior número de recuperações de fundações e outras patologias antes desprezadas em função do pouco hábito de manutenção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análises dos dados

Para análise dos dados dividiu-se o questionário em quatro partes. A primeira onde se historiaram as características da edificação, a segunda dissertou-se sobre o diagnóstico, a terceira como foi feita a recuperação e por último os custos dispensados na recuperação.

3.2 Características das Edificações

As primeiras informações coletadas foram apresentadas as características das edificações compondo-se de sete perguntas, pelas quais se pode ter uma ideia relevante de algumas situações relacionadas a fatores preponderantes para o aparecimento da reação. As perguntas seguiram-se com a seguinte ordenação: a finalidade do empreendimento, o número de pavimentos, a altura do lençol freático, a idade da edificação, como se descobriu o problema e quais os sintomas encontrados, distância do mar para a edificação e o tipo de fundação.

3.2.1 Finalidade do empreendimento

Basicamente, dos 50 empreendimentos verificados, apenas 4% são edificações comerciais e 96% são edifícios residenciais. Neste caso, a maioria das edificações verificadas atualmente compõe-se efetivamente de edifícios residenciais, conforme registrado pela pesquisadora, demonstrado na Figura 3.

3.2.2 Número de Pavimentos

O universo da pesquisa situa-se em edifícios que variavam a quantidade de pavimentos. A contagem foi elaborada levando-se em consideração os pavimentos comuns como subsolo, térreo, vazados, pavimentos tipos e a coberta.

A Figura 4 demonstra os percentuais referentes aos números de pavimentos para edifícios com até 15 pavimentos, em seguida para edifícios de 16 a 25 pavimentos e por último para edifícios com mais de 25 pavimentos, chegando até 41 pavimentos, perfazendo um total de 50 empreendimentos catalogados.

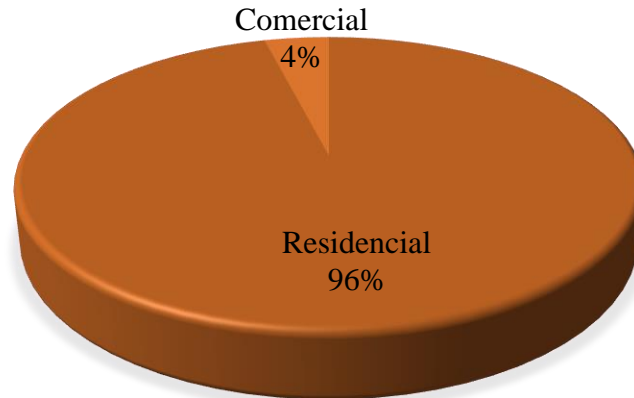
FINALIDADE DO EMPREENDIMENTO

Figura 3. Finalidade do empreendimento

NÚMERO DE PAVIMENTOS

Figura 4. Número de Pavimentos

3.2.3 Altura do lençol freático

Como a ocorrência da RAS está diretamente ligada a três fatores: álcalis normalmente provenientes do cimento, agregado reativo e a presença da água. Nesta investigação buscou-se identificar se ao longo do processo da recuperação foi encontrada água que pudesse favorecer no aparecimento da reação.

No momento em que a fundação foi escavada procurou-se identificar se havia água proveniente de alguma fonte, seja ela do lençol freático ou mesmo de alguma outra condição. Em parte das fundações onde o nível do lençol freático foi identificado, os elementos estavam parcialmente ou apenas com água no nível inferior do elemento. Em se tratando desta reação, é equivocado pensar que o fenômeno se desenvolve apenas em elementos de concretos em contato direto com água, pois aqueles que estejam apenas com o nível inferior do bloco em contato com água estão susceptíveis à reação.

Durante as entrevistas, em algumas empresas a informação estava disponibilizada, em outros casos foi possível identificar através dos acervos das fotos, outras situações na verificação da composição dos custos do orçamento que trazia o dado de rebaixamento do lençol freático, ou seja, os trabalhos de recuperação só poderiam ser executados através do rebaixamento do lençol, e por ser desconhecido o nível em que a água estava estabelecida naquela fundação, considerou-se neste

caso, água na parte inferior do bloco. Em outros casos não havia qualquer informação a respeito da presença da água, então se considerou nível do lençol freático não encontrado.

Partindo-se dessas premissas, este tópico dividiu-se em quatro estágios, onde se encontrava o nível do lençol freático em relação à cota do elemento da fundação: Nível 1, Nível 2, Nível 3 e NE, descritos abaixo:

Nível 1: água no nível inferior do bloco; Nível 2: água no meio do bloco;

Nível 3: água no topo do bloco e NE: nível do lençol freático não encontrado.

Posteriormente, após todas as análises por empresa, desenvolveu-se a Tabela 4 onde os resultados dos lençóis freáticos foram resumidos e abordados de forma geral em relação às cinquenta fundações. Como resultado obteve-se 40% com água no nível inferior do bloco, nível 1; para o nível 2 encontrou-se 18% das fundações com água no meio dos blocos; o nível 3 não identificado. Não foram encontradas as informações do nível do lençol freático em 42% das fundações pesquisas.

Tabela 4. Níveis dos Lençóis encontrados.

Resumo dos níveis dos lençóis				
Empresas	NÍVEL 1 – Água no nível inferior do bloco	NÍVEL 2 - Água no meio do bloco	NÍVEL 3 – Água no topo do bloco	NE – Nível não encontrado
Z Engenheira	50%	25%	0	25%
X Engenheira	67%	33%	0	0
A Engenheira	17%	20%	0	63%
Y Engenheira	100%	0	0	0
T Engenheira	61%	17%	0	17%
Totais	40%	18%	0	42%

3.2.4 Idade da edificação

Outro esforço da pesquisa foi tentar identificar as idades de cada edificação, ou seja, a partir do ano 1, após a conclusão da construção até o momento que foi catalogada pela empresa responsável por sua recuperação. Porém não é uma informação que as empresas tenham disponibilizado em todos os casos estudados. Verificaram-se edificações que apresentaram idades distintas no momento de sua recuperação por RAS.

Encontraram-se edificações com treze anos no momento de sua recuperação, com fundação em sapatas, outras edificações referem-se a fundações em blocos sobre estacas e sapatas com idades de 16, 19, 20, 30 até 45 anos. Na Figura 5, as informações foram citadas considerando-se as idades construtivas da edificação até 20 anos, depois dos 21 aos 30 anos, em seguida dos 31 aos 40 anos e por fim 41 anos em diante e seus respectivos percentuais para essas abrangências de idades. A Tabela 08, apresenta os percentuais das edificações pelo seu tipo de fundação.

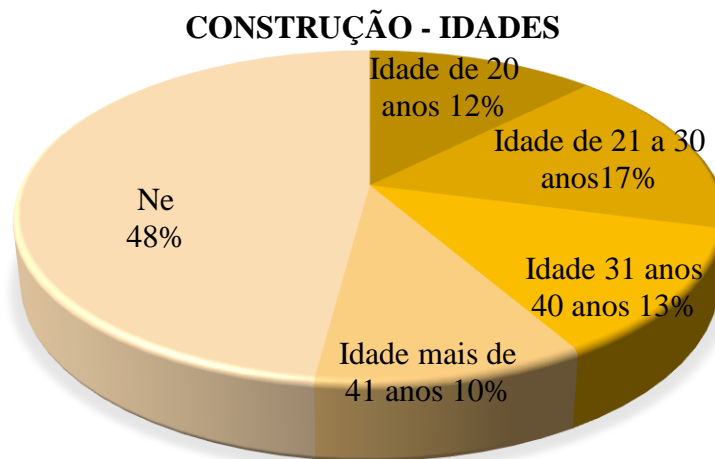


Figura 5. Idades das Construções.

As descobertas dessas fundações atingidas pela reação ocorreram em função das situações adversas citadas anteriormente, como o colapso do edifício Areia Branca e por consequência o surgimento da Lei 13.032, que obrigava os condomínios a fazerem inspeções. A partir daí as descobertas, com idades construtivas diferenciadas, e quadros agravados ou não da reação, foram determinantes, após as constatações da reação através de ensaios, como o ensaio Petrográfico, identificando o grau de agressividade instaurado naquele elemento de fundação, que poderia servir de parâmetro quanto à necessidade de uma intervenção urgente ou não.

Ainda se registraram que os anos em que as recuperações ocorreram foram em períodos variados, mas principalmente em 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, e se estendem até os dias de hoje.

3.2.5 Descoberta da manifestação patológica e os sintomas encontrados

Normalmente dificuldades associadas às interpretações sobre ocorrências de fissuras ou danos de estruturas, ultimamente tem sido recorrente. Os problemas podem ter sido ocasionados por vários fatores como falhas ocorridas durante a fase de concepção de projeto, utilização de materiais incorretos, processo construtivo deficiente e ou devido à falta de manutenção.

Os sintomas são problemas patológicos que apresentam manifestações externas características, a partir das quais se pode deduzir qual a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, bem como se podem estimar suas prováveis consequências. Esses sintomas, também denominados lesões, danos, defeitos ou manifestações patológicas, podem ser descritos e classificados, orientando um primeiro diagnóstico, a partir de minuciosas e experientes observações visuais (Helene, 1992).

Nesta pesquisa os sintomas encontrados quase que se confundem com a descoberta da patologia, pois em 80% dos casos identificados as causas citadas foram às fissuras. Estas que normalmente propagam-se sobre o piso, e em alguns casos foram encontrados pelos pilares do subsolo, térreo ou pilotis, são identificadas por tornar o aspecto do ambiente anormal, em função da patologia inserida sobre os blocos ou sapatas, que demonstram suas evidências no piso imediatamente superior.

3.2.6 Distância do mar para a edificação

Analisou-se este item em função da proximidade com área marinha, que segundo a NBR 6118: (2014), considera-se com o Grau de Agressividade III, considerado forte.

Verificou-se que a maior parte das fundações recuperadas 54% se situam na zona Sul, no Bairro de Boa Viagem. As demais fundações encontram-se na zona Norte, em áreas mais afastadas. Normalmente, a zona Sul, nesta área, o nível do lençol freático é alto o que poderia possivelmente ter possibilitado um ambiente propício para o desencadeamento da reação nas fundações.

3.2.7 Tipo de Fundação

Nas fundações um dos sintomas mais comuns encontrados foi relatado como fissuras. São inúmeras dificuldades em interpretar as patologias causadas pela Álcali Sílica (RAS). Porém é correto afirmar que uma estrutura afetada por essa reação, terá a presença do gel exudado, resultante da reação. Inicialmente, nos primeiros estágios, ou sob condições onde pequenas quantidades foram formadas, a RAS não pode ser visualizada a olho nu, necessitando de especialistas e ensaios executados em amostras retiradas do elemento afetado, para detectá-la.

Segundo Silva (2013) em sua pesquisa verificou-se junto a renomados calculistas, atuantes no mercado imobiliário da construção civil, que algumas mudanças foram inseridas nos projetos de fundações com o propósito de mitigar os efeitos deletérios da reação. Houve a alteração no detalhamento das armaduras dos elementos de fundação, principalmente nos blocos de coroamento das estacas por terem elevados volumes de concreto, dispendo de armaduras com maiores espessuras nas laterais e na parte superior (através de malhas formando uma gaiola), a fim de evitar ou minimizar possíveis fissuras devido a alguma expansão do concreto.

No caso dessa pesquisa como as edificações em questão tinham idades superiores aos 15 anos, os projetos não tinham passado por mudanças no tocante à reação. Na figura 6, visualiza-se que, dos cinquenta empreendimentos citados, apenas dois possuíam fundações em sapatas como elemento de fundação, ou seja, apenas 4%, os outros 96% eram de fundações em blocos.

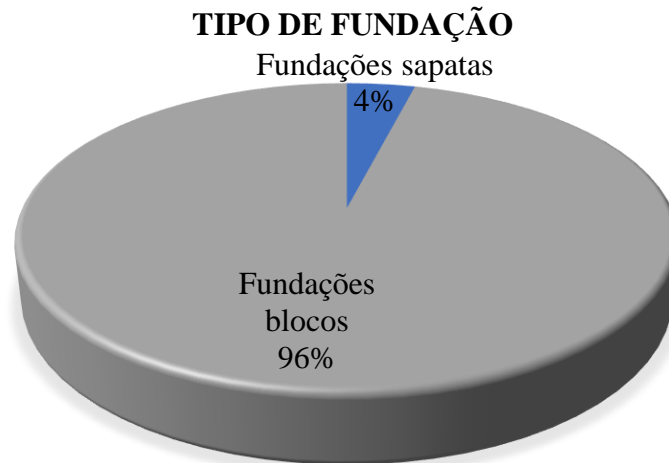


Figura 6. Tipos de Fundações.

3.3 Diagnóstico

O diagnóstico de estruturas de concretos afetados pela reação Álcali Agregado envolve as etapas de coleta de informações, inspeção visual, ensaios em amostras dos materiais componentes do concreto e de testemunhos extraídos da estrutura, a auscultação por meio de instrumentação e acompanhamento de sua evolução por modelagem matemática (Priszkulnik, 2005).

O diagnóstico das fundações afetadas foi construído através das informações visuais, e das respostas concretas dos resultados dos ensaios executados nos testemunhos que concluíram a existência da reação Álcali Sílica. Situações detalhadas foram relatadas sobre o estado em que se encontravam as fundações afetadas pela reação, como a formação das fissuras. A extração de testemunhos foi uma importante ferramenta que permitiu a identificação de fissuras internas, perda de aderência da argamassa na interface com os agregados, ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados que tenham reagido com os álcalis, presença do gel nos vazios e a profundidade de carbonatação.

3.3.1 Local da incidência das fissuras na edificação

As respostas encontradas para o local da incidência de fissuras foram respondidas com informações bem similares. As fissuras foram evidenciadas através de vistorias, em sua maioria de rotina, e ou em função de indícios encontrados sobre os pisos. Os elementos de fundações estavam com fissuras no topo e nas laterais. Executou-se um mapeamento preliminar dos elementos estruturais, onde se verificou o posicionamento das fissuras, seus encaminhamentos, espessuras de sua abertura e onde havia a maior concentração.

Partindo do princípio da junção de todas as informações das inspeções visuais, dos ensaios e das documentações de projeto e da construção da edificação, só assim foi possível analisar e diagnosticar o problema. Portanto ressalta-se a necessidade de ensaios laboratoriais para confirmação da ocorrência da Reação Álcali Sílica.

Também foi relatado pelas empresas envolvidas neste trabalho que as inspeções visuais, assim como as verificações aos projetos são atendidas, porém apenas 48% dos empreendimentos fizeram uso de ensaios laboratoriais. Os outros 52% trataram como resultados a partir das abordagens apenas visuais, como apresentado na Figura 7. Em algumas circunstâncias, em função de questões financeiras os ensaios são dispensados. Em outros depois da verificação in loco do estado da fundação, a reação deletéria estava avançada, conforme a Figura 8, que se tornou imperiosa a recuperação, fazendo com que os condôminos acreditem o diagnóstico apenas a experiência das empresas.

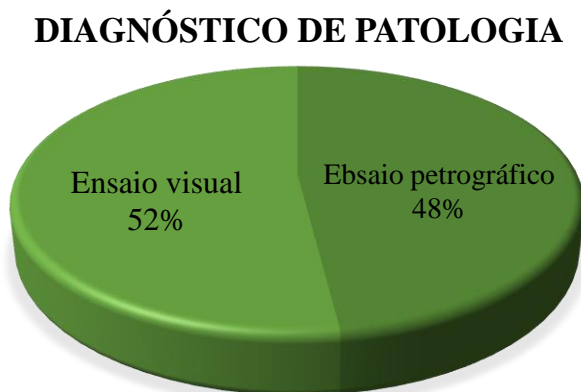


Figura 7. Diagnóstico da patologia.



Figura 8. Fissuração do bloco com RAA

Atualmente vários métodos normatizados são oferecidos no mercado para caracterizar a reatividade potencial expansiva dos agregados minerais no concreto de cimento Portland. A análise petrográfica trata-se de um exame para o diagnóstico da presença de material reativo e também para ocorrência de manifestações associadas à reação, como borda de reação no agregado, microfissuras causadas pela expansão, presença do gel no interior dos poros, dentre outros.

O ensaio utilizado na determinação das patologias desta pesquisa foi o ensaio Petrográfico NBR 15577-3: (2013). Infelizmente, como apresentado anteriormente, em função dos custos os ensaios não foram executados. E nos casos investigados, os testemunhos extraídos dos elementos das fundações foram encaminhados para ABCP (Associação Brasileira de Normas Técnicas) ou para o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), ambos em São Paulo. O maior número de ensaios petrográficos, 80% foram imputados à ABCP e os demais ao IPT.

3.4 Procedimentos das recuperações

No processo das recuperações de estruturas de concreto a qualidade e o resultado dos serviços aplicados depende primeiramente de um diagnóstico preciso e da escolha adequada, que se inclui a seleção de materiais e equipamentos a serem empregados, necessários para execução do serviço. Fatos esses que foram evidenciados com a solicitação de projetos para as fundações onde a reação expansiva encontrava-se em grau elevado de deterioração. Somado a essas questões, buscou-se os resultados das propriedades do concreto exposto à reação, condição imposta pelas empresas, visando constatar as condições em que os concretos anteriores se encontram, com o intuito de garantir os bons resultados na intervenção dos serviços de recuperação.

Diante do exposto de posse desses dados, determina-se o processo de recuperação, as etapas a serem seguidas, os procedimentos de segurança aplicados e quais os materiais que serão utilizados no combate a RAS.

3.4.1 Etapas seguidas no processo da recuperação

As etapas seguidas no processo de intervenção para recuperação da fundação assemelham-se a uma receita para o tratamento de uma doença. Esse processo foi seguido e executado por todas as cinco empresas entrevistadas nessa pesquisa na maioria das recuperações, mudando apenas os materiais empregados na busca pela monolitização dos elementos.

A formulação desses tratamentos de recuperações foi ajustada as questões referentes à dimensão, encaminhamento e profundidade das fissuras. E em se tratando dos processos de recuperação de RAS a busca é garantir que as peças estruturais voltem a funcionar como um todo, monoliticamente, com o fechamento de suas fissuras, conseguido através da injeção de um material aderente e resistente. As etapas que compõe a recuperação e a ordem de sua execução descrevem-se a seguir:

Demolição e escavação dos materiais; Lavagem das Superfícies de Concreto; Apicoamento das superfícies; Furação do concreto; Colmatação e colocação dos purgadores; Injeção nas fissuras; Montagem de armaduras e Concreto estrutural.

3.4.2 Preenchimento das fissuras e materiais utilizados

A injeção é a última etapa no processo de recuperação e tem por objetivo permitir o perfeito preenchimento do espaço formado entre as bordas de uma fenda recompondo a fundação e promovendo sua monoliticidade. Os procedimentos executados nos preenchimentos das fissuras tiveram pequenas variações, de uma empresa para outra, em função do estado em que o elemento estrutural foi encontrado e os critérios desenvolvidos na injeção.

Nos diversos tratamentos estudados foi necessário o uso de materiais com alta resistência mecânica à compressão, à tração e ao cisalhamento e a resina epóxi foi um dos materiais recomendados para o tratamento das trincas e fissuras afetadas pela RAS. Por tratar-se de material rígido após a cura, e importante para restringir o tratamento somente às fissuras e ou trincas passivas, isto é, que não apresentavam movimentação, como foi o caso das fundações citadas neste trabalho.

O segundo material utilizado nas injeções foi o microcimento. Relativamente novo neste procedimento, é um material criado do próprio cimento com uma finura dos grãos com até 8 micrômetros, ou 8 milésimos de milímetro, sendo que 95% das partículas apresentam o mesmo tamanho. Aplicado em recuperações de fissuras passivas é um material rígido, após sua cura e utilizado em áreas secas ou úmidas. Algumas empresas optaram por esse material, pois o mesmo promove à peça estrutural a proteção alcalina das armaduras, a resistência à compressão, tração e cisalhamento e o preenchimento dos vazios, devolvendo o monolitismo e a resistência da estrutura. Na pesquisa verificou-se uma maior utilização das resinas epóxicas em 82% das fundações, seguidos do microcimento em 6% das fundações e em 10% não foi identificado o material utilizado, visualizadas na figura 9.

No processo de injeção a utilização dos purgadores plásticos e metálicos foi executada, visualizados nas Figuras 10 e 11. Os purgadores metálicos fazem parte dos novos avanços no processo de injeção, aos quais se imputa uma injeção com maior pressão, e conseqüentemente a penetração do material até áreas de maiores profundidades em um curto espaço de tempo. Porém em todos os materiais coletados deste estudo, a colmatação é um procedimento utilizado no fechamento das fissuras externas para garantir a injeção, e o material mais utilizado são as mangueiras plásticas, mais simples e facilmente encontrado no comércio.



Figura 9. Materiais utilizados nas Injeções.

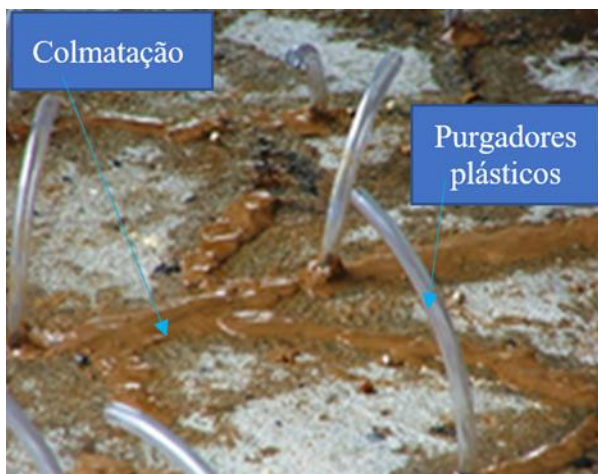


Figura 10. Purgadores plásticos.



Figura 11. Purgadores metálicos.

3.4.3 Encamisamento e o cálculo do reforço

Segundo Silva (2007) para realização do processo construtivo de encapsulamento dos blocos afetados pelo fenômeno expansivo da RAS, primeiramente deve-se ter um entendimento a respeito do comportamento da estrutura a ser recuperada. Com o aparecimento do fenômeno da Reação Álcali Sílica nos blocos de fundação nos edifícios da região Metropolitana do Recife, entender o comportamento dessas estruturas passou a ser um desafio para os técnicos e para os calculistas de estruturas. Como estabelecer um diagnóstico preciso e adotar técnicas que sejam eficazes para o problema, ou seja, devolver à obra sua estabilidade e confiabilidade de projeto.

No caso das fundações atingidas, as áreas com poucas armaduras ficaram susceptíveis as expansões causadas pela reação. Ensaios em laboratório mostraram que no concreto a expansão está restrita à área onde não ocorrem fortes compressões. Ou seja, fundações como as sapatas, que na época tinham armaduras apenas nas áreas inferiores e as áreas superiores (cuscuz) normalmente tinham

pouca ou nenhuma armadura, eram susceptíveis à expansão. O cálculo do reforço foi determinado em alguns casos, através da intervenção de calculistas. A avaliação para o uso do projeto determinou-se em função do quadro de expansão encontrado, nas fundações com a reação deletéria avançada era solicitada a verificação do calculista. Os encamisamentos responderam por 81% dos elementos de fundação com o uso de armadura e 19 % não foram identificados, visualizado na Figura 12.

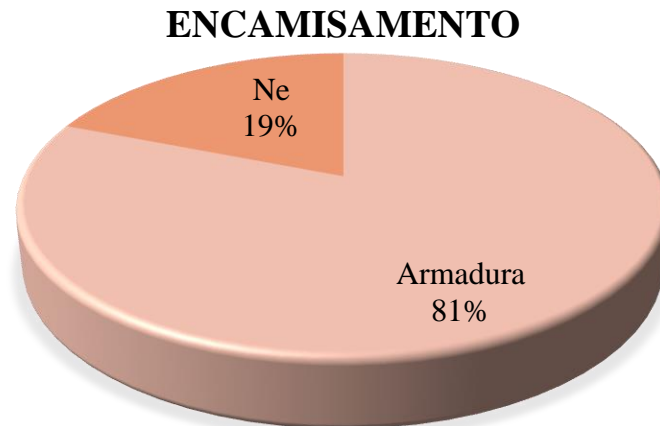


Figura 12. Uso da Armadura.

3.4.4 Impermeabilização

Durante a construção das fundações, sejam elas sapatas ou blocos em função da reação foi assegurada a salubridade e a durabilidade das fundações através da impermeabilização. Importante etapa em função da exposição desses elementos em contato permanente com a umidade do solo e, que quando não tratados, conduzem a umidade por capilaridade.

Para evitar possíveis problemas patológicos causados pela umidade é imperiosa a utilização de um sistema de impermeabilização compatível com a geometria das peças e com as características de estrutura, como o nível do lençol freático. Verificou-se na pesquisa que em todas as fundações recuperadas utilizou-se a impermeabilização nos topos e laterais dos elementos, visualizada na Figura 13.



Figura 13. Bloco impermeabilizado.

3.5 Custos das recuperações

Os recursos dispensados nas recuperações dependeram do como seria o tipo de intervenção solicitada e dos valores apresentados. O custo da recuperação foi diretamente proporcional à

solução adotada para execução, considerando a metodologia, especificações dos materiais, mão de obra utilizada, trabalhos complementares, como escoramentos e andaimes, bombas de rebaixamentos, entre outras.

Verificou-se ao longo da pesquisa que os custos, bastantes onerosos, são de responsabilidade do condomínio e foram variados e divididos em dois grupos, conforme a disponibilidade econômica de cada condomínio. O primeiro grupo realizou a recuperação completa em 100% das fundações e segundo grupo as recuperações foram executadas por partes e por extensos períodos.

3.6 Janela de inspeção

Como resultado, constatou-se que das 50 fundações pesquisadas, apenas duas deixaram as janelas de inspeções. As janelas são pequenas aberturas deixadas nos elementos de fundações, para acompanhamento das recuperações, visíveis nos pisos superiores, visualizadas na Figura 14 Internamente são colocados pequenos pedaços de vidros visualizados na Figura 15, onde anteriormente identificou-se as fissuras, que após sua reabilitação, será acompanhada periodicamente. Caso ocorra alguma nova movimentação do bloco de fundação, a tendência desse vidro será romper, indicando possíveis indícios da continuidade da RAS, ou alguma outra manifestação patológica.

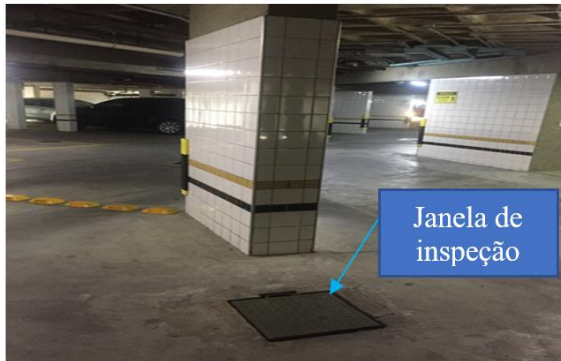


Figura 14. Janela de inspeção.



Figura 15. Interior da janela de Inspeção.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo traçar um perfil dos processos utilizados nas recuperações das fundações atingidas pela reação Álcali Sílica, através da verificação de estudos de casos em 50 fundações que foram reabilitadas. São apresentados os resultados, que foram divididos em quatro partes compreendendo as características, o diagnóstico, a recuperação e custos. As análises dos primeiros resultados forneceram as seguintes afirmações sobre as características construtivas:

- ✚ Na finalidade dos empreendimentos pesquisados 96% são residenciais e 4% comerciais;
- ✚ Com relação ao número de pavimentos, encontraram-se estruturas de 15, 25, 30 até 41 pavimentos;
- ✚ Determinando os fatores condicionantes que influenciam na Reação estabeleceu-se que várias fundações estavam com seus elementos emergidos parcialmente em água do lençol freático. Dessas constatações verificou-se que 40% das fundações estavam inseridas no nível 1, ou seja, possuía água advinda do lençol freático em contato permanente com a parte inferior do bloco, 18% das fundações com água no meio do bloco, nível 2 e o nível 3 não foi encontrado. Em 42% das fundações não foram identificadas o nível do lençol freático;
- ✚ As idades construtivas, outro dado analisado das edificações, variaram dos 10, 15, 16, 20, 22, 25, 30, 40, 41 chegando até 45 anos;

- ✚ As descobertas das manifestações ocorreram através de verificações de rotinas que indicaram o aparecimento de fissuras nos pisos dos estacionamentos em 80% dos casos pesquisados;
- ✚ Nas distâncias das edificações em relação ao mar, verificou-se que 54% das fundações encontravam-se na zona Sul e 46% na zona Norte;
- ✚ Os tipos de fundações encontrados foram sapatas com apenas 4% e blocos com 96%.

No segundo material analisado, o diagnóstico concluiu-se as seguintes questões:

- ✚ O local da incidência das fissuras foi identificado nos blocos e sapatas nas laterais e no topo dos blocos;
- ✚ O diagnóstico de 42% dos materiais analisados, fez uso de ensaios em laboratório. E através de estudos com a participação de calculistas e especialistas na área de concreto, e em função do quadro fissuratório, da idade da edificação e do ambiente onde estava inserida a fundação, traçaram uma metodologia de recuperação para RAS baseados em resultados de ensaios advindos de extrações de testemunhos que respaldaram no aparecimento de uma receita para combate a doença da expansão. Todavia os 58% dos materiais analisados buscaram opiniões de empresários, dos quais parte deles possuía bastante experiência nos processos de recuperações e outros eram supostamente da área, e em função de suas experiências em outros trabalhos, sem a presença de calculistas e resultados de ensaios, determinou que a intervenção deveria ser tratada como reação Álcali Sílica seguindo a receita de recuperações usadas em outros casos.
- ✚ Os ensaios utilizados no diagnóstico da reação dos 42% das fundações foi o ensaio Petrográfico e os 58% restante diagnosticaram a reação através de ensaios apenas visuais.

Na terceira análise observou-se as informações sobre as recuperações:

- ✚ As recuperações foram semelhantes na maioria das cinquenta fundações verificadas e seguiram o seguinte procedimento: demolição e escavação das peças estruturais, lavagem da superfície dos elementos, apicoamento e furação do concreto, colmatação, injeção, montagem da armadura de reforço, concretagem e impermeabilização.
- ✚ A injeção no preenchimento das fissuras os materiais utilizados foram o epóxi em 84% das fundações, o microcimento em 6% das fundações e em 10% das fundações não foi identificado. Preenchidas com auxílio de bomba pneumática de injeção;
- ✚ O encamisamento foi utilizado em 81% das fundações e em 19% não foi identificado. A escolha desse processo foi através do grau de deterioração em que a fundação se encontrava. Nas fundações mais degradadas fez-se o uso de recuperações através a intervenção do projeto do calculista.

O quarto material compilando foram os custos dispensados nas recuperações e as janelas de inspeções:

- ✚ Os custos foram pagos integralmente pelos condomínios, com exceção de duas recuperações. Uma apresentou 50% dos custos pagos foi pela construtora e os outros 50% pelo condomínio. A outra foi à recuperação de apenas quatro sapatas e os custos pagos pela construtora. Constataram-se valores onerosos nas recuperações que variaram em função das dimensões das peças, do grau de degradação da fundação e também do procedimento escolhido para restauração da mesma;
- ✚ O último objetivo desta pesquisa seria identificar as fundações que passaram por recuperações e se foi deixada uma janela de inspeção para possíveis verificações posteriores. Em apenas em 4% das fundações foram deixadas janelas de inspeções.

5. CONCLUSÕES

Com o resultado desta pesquisa pode-se ter um panorama real dos procedimentos utilizados nas recuperações nos anos de 2004 até os dias atuais. Porém, sabe-se que nos tratamentos aplicados constataram-se a semelhança desses processos, seguidos de pequenas mudanças. Em entrevista com alguns dos responsáveis pelas empresas, constatou-se que desde as recuperações feitas na ponte Paulo Guerra em 2000, os materiais utilizados e os procedimentos de recuperações obtiveram poucos avanços. A exemplo, a injeção utilizando os purgadores plásticos e metálicos, muito embora o sistema utilizado com os purgadores plásticos ainda é o mais solicitado. Outra mudança verificada ocorreu nos materiais utilizados na injeção, com o uso do microcimento, porém o epóxi permaneceu como material mais usado.

Nas recuperações das fundações executadas fazem-se necessário um acompanhamento efetivo e sistemático uma vez que a Reação Álcali Sílica poderá manifestar-se novamente, pois ainda existem muitas lacunas no tocante aos resultados destas intervenções, revelando-se de extrema importância à aplicação de uma janela de inspeção que possibilite às verificações do acompanhamento. Principalmente nas fundações reabilitadas que não apresentaram acompanhamento técnico de pessoal habilitado e resultados de ensaios, itens preponderantes para a determinação consciente e coerente dos procedimentos a manifestação patológica. Em função disto, tem-se a falta de um diagnóstico concreto que possivelmente levará a utilização de processos equivocados e a continuidade de uma doença não curada. Denotou-se que a busca por menores custos, contrária às boas práticas de execução e garantia de bons resultados. Nas cinquenta fundações pesquisadas, apenas duas deixaram as janelas de inspeções, isso representa 4% das obras pesquisadas que possibilitaram o acompanhamento.

Nos materiais pesquisados, verificaram-se a busca por informações no tocante a química da reação, a microestrutura dos agregados, as medidas mitigadoras, prevenções, porém faz-se necessário um olhar para aquelas fundações recuperadas, as quais não se tem a resposta da eficiência desses procedimentos utilizados enquanto forma de recuperação, nem o tempo de sua durabilidade. A eficácia de resultados futuros no combate a RAA em fundações idosas também deveria ser motivo para acompanhamentos sistemáticos para garantia de sua saúde estrutural.

5. AGRADECIMENTOS












O presente artigo é de grande relevância para a comunidade científica/acadêmica e não seria possível sem a colaboração de todos os participantes que se fizeram presentes durante sua produção e desenvolvimento. Somos imensamente gratos à Universidade Católica de Pernambuco e à Universidade de Pernambuco, pela parceria na elaboração do artigo e pelo apoio através do Edital de Apoio ao Pesquisador - APQ 2019 e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- Andrade, T.; Silva, J. J. R.; Almeida R.; Figueirôa, J. P.; Kihara, Y.; Pecchio, M. (2006), “*Diagnóstico de Reação Álcali-Agregado em Blocos de Fundação de um Edifício Público situado na Cidade do Recife/PE.*” In: II Simpósio Sobre Raa em Estruturas de Concreto. IBRACON.
- Andrade, T. (2006) “*Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife.*”, In: II Simpósio Sobre Raa em Estruturas de Concreto. IBRACON.
- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.* Rio de Janeiro.

- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577-1: Guia para Avaliação da Reatividade Potencial e Medidas Preventivas para Uso de Agregado em Concreto*. Rio de Janeiro, 2008. 11p.
- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577-2: Coleta, Preparação e Periodicidade de Ensaio de Amostras de Agregados para Concreto*. Rio de Janeiro, 2008. 2p.
- Associação de Normas Técnicas. (2013) *NBR 15577-3: Análise Petrográfica para Verificação de Potencialidade Reativa de Agregados em Presença de Álcalis do Concreto*. Rio de Janeiro, 2008.8p.
- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577-4: Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado*. Rio de Janeiro, 2008.12p.
- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577-5: Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado*. Rio de Janeiro, 2008.5p.
- Associação de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15577-6: Determinação da Expansão em Prismas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2008.16p.
- Associação de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Estruturas de concreto armado – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- Battagin, A.; Silveira, A.L.; Munhoz, F.; Battagin, I. (2016), “A Evolução da Cultura da Prevenção da Reação Álcali-Agregado no Mercado Nacional.” Associação Brasileira de Cimento Portland. In: *Concreto e construções*. Ano 44. Ed. IBRACON.
- Hasparyk, N. P. (1999), “Investigação dos Mecanismos da reação Álcali-Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa.” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Hasparyk, N. (2005), “Investigação do Concreto Afetados pela Reação Álcali Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado.” Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Helene, P. (1992), *Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto*. 2ª Ed. São Paulo, PINI.
- Priszkulnik, S. (2005), *Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas reações Cimento-Agregado*. In: ISAIA, G.C. *Concreto: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ed. Ibracon. Vol 2.
- Silva, C. S. (2013), “Reação Álcali-Agregado: Diagnóstico, Tratamento e Cuidados na Execução de Elementos em Concreto Armado nas Fundações da RMR.” Monografia em Engenharia, Universidade de Pernambuco, Recife.
- Silva, G. A. (2007), “Recuperação de Blocos de Coroamento afetados pela reação Álcali-Agregado.” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.
- Munhoz, F. A. C. (2007), “Efeito de Adições Ativas na Mitigação das reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato.” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Otoch, S. (2016), Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?. “A Evolução da Cultura da Prevenção da Reação Álcali-Agregado no Mercado Nacional.” Associação Brasileira de Cimento Portland. In: *Concreto e construções*. Ano 44. Ed. IBRACON.

Revista Alconpat: 10 anos de história (2011 - 2021)

P. Castro-Borges^{1*} , E. Sabido-Maldonado², J. M. Mendoza-Rangel³ , P. Helene⁴ ,
P. Garcés-Terradillos⁵ , A. A. Torres-Acosta⁶ , M. Fernández-Cánovas⁷ , R. Husni⁸,
O. Troconis-Rincón⁹ , F. Branco¹⁰ , J. I. Escalante-García¹¹ , F. Alonso-Farrera¹² ,
M. A. Olavarrieta-Parisot¹³ 

* Autor de Contato: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.534>

Recepção: --/--/---- | Aceitação: --/--/---- | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar à comunidade as conquistas e desafios da Revista Alconpat em seus primeiros dez anos de existência. Narra-se: como surgiu a ideia de uma revista científica / técnica na Alconpat Internacional; quando, como e onde as discussões e o projeto ocorreram; como foi a implementação, a primeira questão, a pontualidade; os requisitos e desafios a cumprir para as primeiras indexações (Scielo México, Scielo WoS, Redalyc, Latindex, Google); os projetos do CONACyT que possibilitaram atender gradativamente os requisitos para eventuais aplicações em índices superiores (Scopus e WoS), repositórios, diretórios (DOAJ) e super servidores; marcações eletrônicas, publicação em três idiomas (espanhol, português e inglês), tempos administrativos para publicação específica, etc. Ao final, um extenso agradecimento a todos aqueles que participaram desses primeiros 10 anos.

Palavras-chave: Revista Alconpat; Scielo; WoS; Redalyc, Latindex, Google Scholar.

Citar como: Castro-Borges, P., Sabido-Maldonado, E., Mendoza-Rangel, J. M., et al. (2021), "Revista Alconpat: 10 anos de história (2011-2021)", Revista ALCONPAT, 11(2), pp. 146 – 157, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.534>

¹ Cinvestav del IPN, Unidad Mérida, Yucatán, México; **Editor en Jefe** fundador de Revista Alconpat, México.

² Alconpat-Internacional, **Editor Asistente** de Revista Alconpat, México.

³ Facultad de Ingeniería Civil, UANL; **Editor Gerente fundador** de Revista Alconpat, México.

⁴ Universidad de Sao Paulo; **Editor Asociado fundador** y en funciones de Revista Alconpat, Editor de Idioma, Brasil.

⁵ Universidad de Alicante; **Editor Asociado** y en funciones de Revista Alconpat, España.

⁶ Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro; **Editor Asociado** en funciones de Revista Alconpat, México.

⁷ Universidad Politécnica de Madrid; **Editor Asociado fundador** en funciones de Revista Alconpat, España.

⁸ Universidad de Buenos Aires; **Editor Asociado fundador** en funciones de Revista Alconpat, Argentina.

⁹ Universidad de Zulia; **Editor Asociado fundador** en funciones de Revista Alconpat, Venezuela.

¹⁰ Instituto Técnico Superior de Lisboa; **Editor Asociado fundador** en funciones de Revista Alconpat, Portugal.

¹¹ Cinvestav del IPN, Unidad Saltillo, Coahuila, México; **Editor Asociado fundador** de Revista Alconpat, México.

¹² Universidad Autónoma de Chiapas, México; **Co-Editor en Jefe** (2020-2021) de Revista Alconpat, México

¹³ Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado; **Editor de Idioma** en funciones de Revista Alconpat, Venezuela

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, P. Castro-Borges conceituou o trabalho, conduziu a discussão e redigiu o artigo; E. Sabido-Maldonado realizou a formatação, coletou as informações, preparou as figuras e tabelas e contribuiu para a discussão de como apresentar as informações; os demais coautores participaram da discussão e revisão do trabalho.

Revista Alconpat: 10 years of history (2011 - 2021)

ABSTRACT

The objective of this work is to present to the community the achievements and challenges to come of the Alconpat Journal in its first ten years of existence. A narration is made of: how the idea of having a scientific / technical journal in Alconpat International arose; when, how and where the discussions and the project took place; the implementation, the first issue, the punctuality; the requirements and challenges to meet for the first indexations (Scielo México, Scielo WoS, Redalyc, Latindex, Google); the CONACyT projects that made it possible to gradually meet the requirements for eventual applications at higher indexes (Scopus and WoS), repositories, directories (DOAJ) and super servers; electronic markings, publication in three languages (Spanish, Portuguese and English), administrative times for publishing any specific issue, etc. At the end, an extensive acknowledgement is made to all those who have participated in these initial 10 years.

Keywords: Alconpat Journal; Scielo; WoS; Redalyc, Latindex, Google Scholar.

Revista Alconpat: 10 años de historia (2011 – 2021)

RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar a la comunidad los logros y retos, enfrentados, actuales y por venir, de la Revista Alconpat en sus primeros diez años de existencia. Se realiza una narración de: cómo surgió la idea de tener una revista científico/técnica en Alconpat Internacional; cuando, como y donde se llevaron a cabo las discusiones y el proyecto; la implementación, el primer número, la puntualidad; los requisitos y retos a cumplir para las primeras indizaciones (Scielo México, Scielo WoS, Redalyc, Latindex, Google); los proyectos CONACyT que permitieron cumplir poco a poco los requisitos para eventuales aplicaciones a índices superiores (Scopus y WoS), repositorios, directorios (DOAJ) y super servidores; marcaciones electrónicas, publicación en tres idiomas (español, portugués e inglés), los tiempos administrativos para publicación puntual, etc. Al final se hace un extenso agradecimiento a todos los que han intervenido en estos 10 años iniciales.

Palabras clave: Revista Alconpat; Scielo; WoS; Redalyc, Latindex, Google Académico.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano AAAA, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano de AAAA.

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 ideia de criar a Revista da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção ALCONPAT Int. começou no âmbito do Congresso CONPAT 2003, quando a real necessidade de um mecanismo formal de divulgação foi levantada pela primeira vez nessa Associação. O Objetivo era uma revista séria, acadêmica e original, que concentra-se seus esforços em temas originais cultivados por quase 30 anos na Associação. A evolução da ideia e do projeto levou vários anos para se consolidar, mas tudo se fortaleceu à medida que o trabalho técnico de qualidade apresentado nos eventos do CONPAT aumentava. Foi durante o Congresso CONPAT 2009 que o tema foi formalmente apresentado ao Conselho Superior, o mais alto órgão da Associação. Naquele momento estava sendo formalmente instituída a revista, conseguindo sua aprovação para iniciar oficialmente suas atividades no ano seguinte. Durante 2010, foi feito um trabalho intensivo na concepção e implementação do site para o mecanismo de envio, recebimento, avaliação e publicação dos artigos, enfim, em 31 de dezembro de 2010 a primeira edição do volume 1 correspondente a 2011 seria publicada eletronicamente, lançada como "Revista ALCONPAT" (ou RA).

Em 2013, é gerado o registro de informações legais que inclui o direito de uso internacional exclusivo do nome "Revista ALCONPAT" e seu número ISSN correspondente (ISSN: 2007-6835). Em 2015, durante a publicação do volume 5, a RA participou do Edital para pertencer ao Índice de Revistas Científicas e Tecnológicas do CONACyT (Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia – México), alcançando essa distinção no mesmo ano. Este fato é um divisor de águas que elevou a RA a padrões mais elevados, como a adesão de índices de prestígio, migração para a plataforma OJS (Open Journal System) e do DOI (Identificador de Objetos Digitais), entre outros. Atualmente, a revista subiu ao mais alto nível de "International Competent Magazine" segundo os critérios do CONACyT.

Em 2016, graças à indexação do CONACyT, a revista foi incorporada ao índice Scielo México e, juntamente com ela, a inclusão no SciELO Citation Index, banco de dados integrante da Web of Science. Em 2017, o RA começa no Google Acadêmico, onde dados importantes podem ser consultados.

Em 2018, a RA postulou um longo processo de inclusão no Scopus, e um ano depois o feedback foi recebido com sugestões de pequenas mudanças que foram implementadas e que serão reavaliadas a partir de maio de 2021. Em 2018 a RA foi incorporando outros índices como o Redalyc e na plataforma OJS 2 uma seção de estatísticas foi incorporada para poder ver qual artigo foi mais baixado, qual país tem mais visitas, que é o número mais consultado, etc., e a implementação da publicação do XML Jats. Da mesma forma, a RA foi incluída em 2018 no Catálogo e Diretório Latindex.

Em 2020, a RA passou para a versão mais recente e estável do sistema de avaliação OJS (Versão 3.2.1.4), um novo *design* de portal, novos *plugins* incorporados como XML Viewer, módulo Catch, módulo de compartilhamento de artigos, etc., bem como a atualização e incorporação de novas políticas editoriais e éticas, tudo com apego ao COPE (Comitê de Ética em Publicação), isso a fim de aumentar a visibilidade e a acessibilidade.

Foi escolhida a opção de alterar a licença *creative commons* e foi escolhida uma postura mais aberta e menos restrita (CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que é um requisito para pertencer ao DOAJ (Directory of Open Access Journals). Outro dos requisitos de obtenção de importantes índices são os sistemas de preservação digital que estão agora disponíveis; uma licença de software anti-plágio (iThenticate com Crossref Similarity Check), e também uma ferramenta do Google Analytics, que fornece estatísticas individuais por artigo e outras melhorias que permitirão a entrada durante 2021-2022 para o DOAJ e provavelmente para Scopus e JCR. Como dados importantes, a RA já possui um Fator de Impacto (FI) que em 2016 foi de 0,03 gradualmente

aumentando para 0,16 no Scielo Analytics (Tabela 1), esperando que melhore e seja endossado quando incorporado a outros índices.

Tabla 1. Fator de impacto da Revista Alconpat desde 2016 (Scielo México)

Ano base 2016	Citações em 2016 para				Artigos publicados em			Fator de impacto	Citações em 2016 para artigos de 2016	Artigos publicados em 2016	Índice de imediatez
	todos os anos	2015	2014	2015+2014	2015	2014	2015+2014				
	7	0	1	1	18	18	36				
Ano base 2017	Citações em 2017 para				Artigos publicados em			Fator de impacto	Citações em 2017 para artigos de 2017	Artigos publicados em 2017	Índice de imediatez
	todos os anos	2016	2015	2016+2015	2016	2015	2016+2015				
	7	0	1	1	22	18	40				
Ano base 2018	Citações em 2018 para				Artigos publicados em			Fator de impacto	Citações em 2018 para artigos de 2018	Artigos publicados em 2018	Índice de imediatez
	todos os anos	2017	2016	2017+2016	2017	2016	2017+2016				
	13	2	1	3	22	22	44				
Ano base 2019	Citações em 2019 para				Artigos publicados em			Fator de impacto	Citações em 2019 para artigos de 2019	Artigos publicados em 2019	Índice de imediatez
	todos os anos	2018	2017	2018+2017	2018	2017	2018+2017				
	14	2	4	6	16	22	38				

Como resultado do aumento da visibilidade da RA, também houve um aumento de consultas e *downloads*, como mostrado na Fig. 1. Em particular, chama a atenção a variedade de países que consultam RA, que é graficamente mostrada na Fig. 2, e quantitativamente na Fig. 3. A RA foi revisada e/ou baixada em mais de 130 países. A tendência na distribuição desses *downloads* de alguma forma reflete a distribuição geográfica dos autores, o acesso a fontes de informação, o grau de desenvolvimento científico, entre outros.

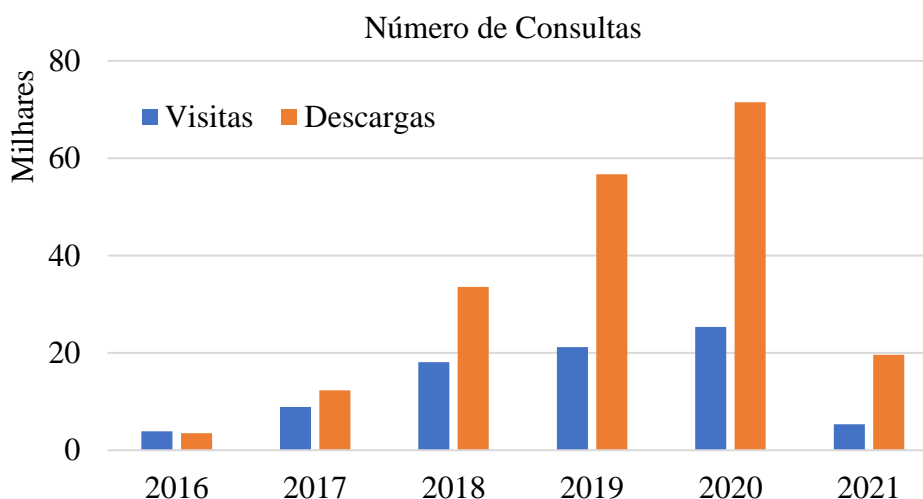


Figura 1. Descargas e visitas à página, número de consultas de resumos dos artigos desde 2016 a 2021. (fonte: OJS da Revista Alconpat)

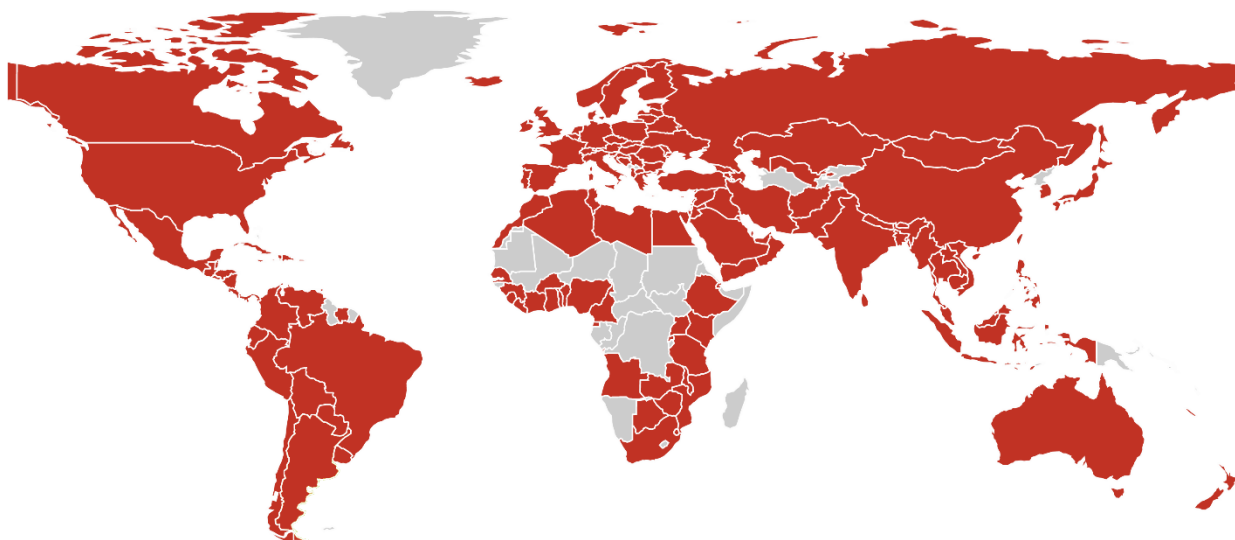


Figura 2. Países com maior número de visitas, em cor vermelha. (OJS da Revista Alconpat)

Tabla 2. Países com números de visitas no ano de 2020.

País	No de visitas	País	No de visitas	País	No de visitas	País	No de visitas
Brasil	9303	Indonesia	89	Nepal	19	Belice	4
México	3672	Uruguai	74	República Unida de Tanzania	17	Senegal	4
Estados Unidos de América	3320	Grecia	73	República de Servia	17	Togo	4
Perú	2152	Irak	70	Dinamarca	16	Zimbabue	4
India	1685	Australia	65	Lituania	15	Yemen	4
Colombia	1421	Sudáfrica	64	Mongolia	15	Bielorrusia	4
Russia	1138	Honduras	62	Marrocos	14	Jamaica	3
Espanha	886	República Dominicana	60	Bulgaria	13	Haití	3
Bolivia	783	Polonia	60	Austria	13	Islandia	3
Argentina	565	Malasia	60	Nova Zelanda	13	Benín	3
Porcelana	565	Egito	59	Eslovenia	12	Guinea	2
Alemanha	456	Tailandia	58	Siria	11	Sierra Leona	2
Ecuador	436	Etiopía	56	Albania	11	Liberia	2
República Checa	408	Emiratos Árabes Unidos	54	Porto Rico	10	Costa de Marfil	2
França	402	Nigeria	49	Líbano	10	Botswana	2
Portugal	395	Costa Rica	48	Kazajstán	10	Djibouti	2
Coreia do Sur	350	Vietnam	45	Ruanda	9	Macedonia	2
Chile	342	Moçambique	42	Kuwait	9	Georgia	2

Ucrania	325	Israel	40	Katar	8	Laos	2
Reino Unido	298	Bélgica	38	Letonia	8	Surinam	1
Panamá	231	Kenia	37	Estonia	8	Burkina Faso	1
Venezuela	170	El Salvador	36	Afganistán	8	Guinea Ecuatorial	1
Irlanda	170	Angola	32	Camarão	7	Swazilandia	1
Canadá	168	Noruega	28	Uganda	7	Malawi	1
Italia	160	Ghana	28	Túnez	7	Armenia	1
Filipinas	130	Noruega	28	Croacia	7	Azerbaiyán	1
Suecia	125	Bangladesh	28	Zambia	6	Uzbekistan	1
Japão	123	Arabia Saudita	27	Chipre	6	Bután	1
Países Baixos	118	Suiça	27	Camboja	6	Myanmar	1
Cuba	116	Nicaragua	26	Trinidad y Tobago	5	Nueva Caledonia	1
Pavo	115	Argelia	26	Libia	5	Fiyi	1
Paraguai	110	Jordán	26	Bosnia y Herzegovina	5		
Guatemala	108	Finlandia	26				
Pakistán	100	Taiwán	26				
		Omán	23				

RA tem a maior taxa de internacionalização que considera Redalyc, Fig. 3. O índice de internacionalização é composto por 5 grupos e igual número de subgrupos. O maior nível de internacionalização é definido pelo G1 e pelo menor G5.

O índice de internacionalização é derivado de três variáveis com diferentes pesos:

1. Proporção (%) autores estrangeiros (valor 0,25);
2. Número de países estrangeiros (valor 0,35);
3. Proporção de artigos com pelo menos um autor estrangeiro (valor 0,45).

O nível de internacionalização de uma revista permite observar o nível de participação estrangeira. O Grupo G11 indica o maior nível de internacionalização e o G55 a menor internacionalidade ou maior endogeneidade. Redalyc considerou importante criar subgrupos porque o G21 indica que ele está muito próximo do G1, enquanto o G25 indica que ele está muito mais próximo do G3 e provavelmente descenderá do grupo. Manter o G1 é um desafio para qualquer revista, especialmente aquelas que aspiram a importantes índices científicos como esta RA.

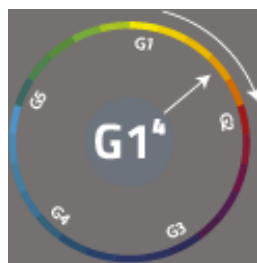


Figura 3. Índice de internacionalização da Revista Alconpat (Dados e figura cortesia de Redalyc).

Um dos desafios da RA tem sido manter um padrão em termos de pontualidade e tempos de publicação. Desde o início, uma tendência média ótima foi prometida em torno de 17 semanas (4 meses) desde a submissão até a publicação, que segundo Redalyc permaneceu muito próxima aos 17,39, conforme denotado na Fig. 4.



Figura 4. Semana média de recepção – aceitação da Revista Alconpat :17.39 semanas (Dados cortesía de Redalyc).

Como outras revistas que são avaliadas por diversos índices, a Revista Alconpat deve manter uma importante produção citável, pois devido à sua vocação inicial de ciência aplicada na qual faz uso de estudos de caso como sua motivação inicial mais importante. As tendências dos últimos 10 anos têm sido um aumento na produção citável, como denotado por artigos de pesquisa e revisão publicados desde então. A distribuição por tipo de item durante esses 10 anos pode ser vista na Fig. 5.

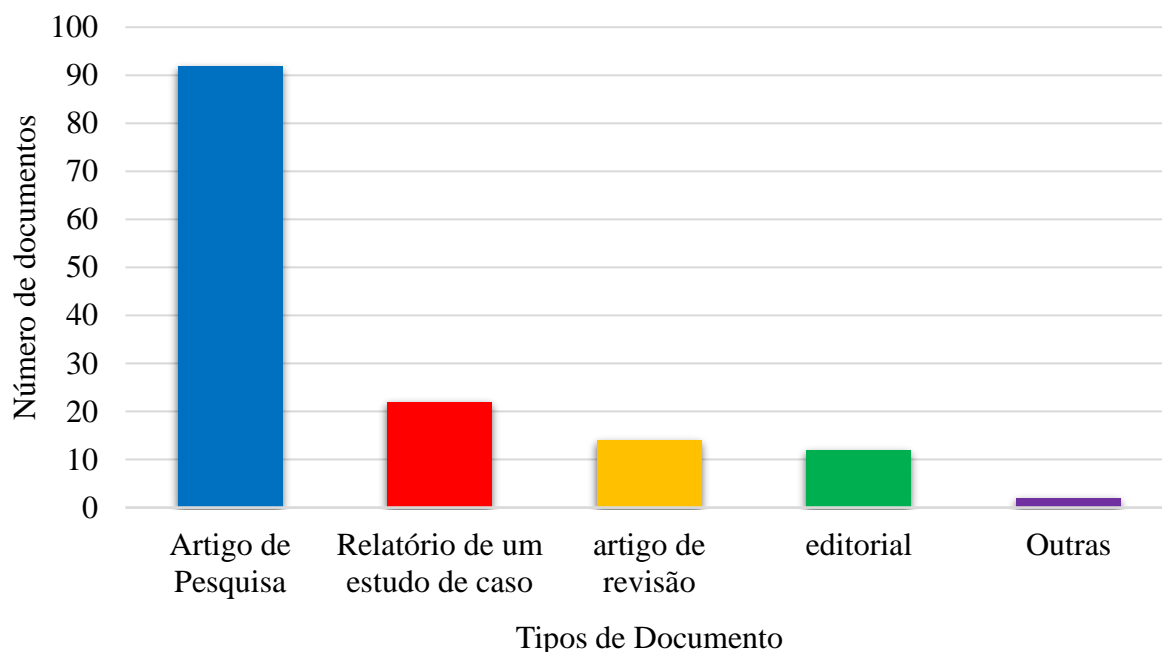


Figura 5. Distribuição de documentos por tipos de artigo (Dados cortesía de Scielo Analytics)

Sem dúvida, a internacionalização da RA ainda é observada grandemente na América Latina, embora cada vez mais trabalho do resto do mundo esteja sendo publicado, como mostra a Fig. 6. A forte influência do Brasil e do México marcou a RA nesses 10 anos.

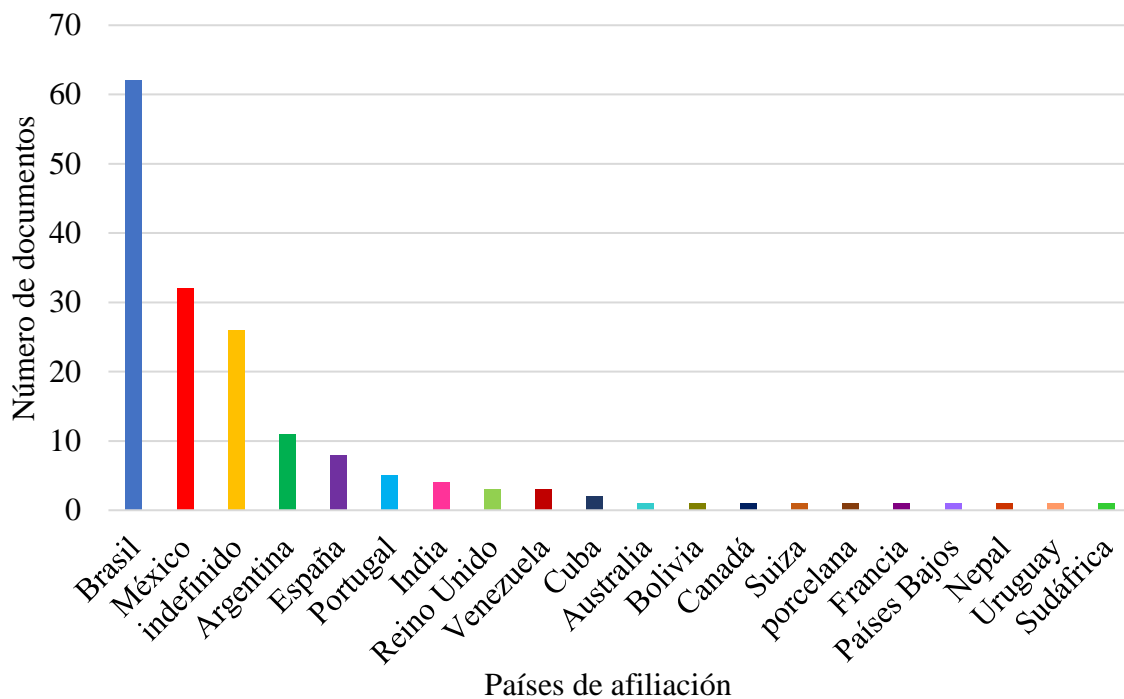


Figura 6. Distribuição de documentos por países de publicação (dados de Scielo Analytics)

Sem dúvida, o número de autores por artigo é uma questão que envolve cada vez mais a avaliação nos Conselhos de Ciência e Tecnologia de nossos países. A Fig. 7 mostra essa tendência na RA, onde há predominância na área de 3-4 autores, o que é bastante atrativo para sistemas de avaliação como México ou Brasil. Destaca-se, ainda, a importante presença de artigos com um único autor, que denota independência e liderança, que coincidem com a trajetória desses autores em seus artigos.

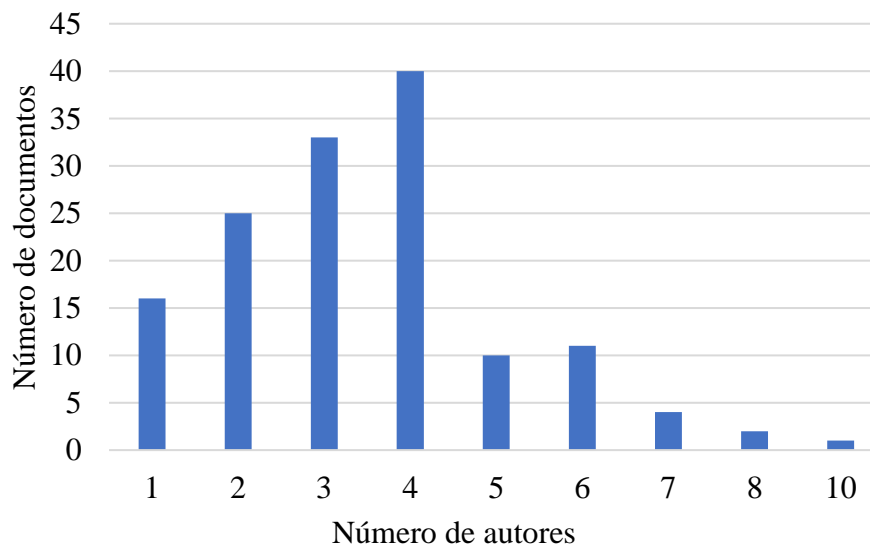


Figura 7. Distribuição de documentos por número de autores por artigo (dados cortesia de Scielo Analytics).

Um aspecto importante na qualidade de uma Revista são as referências, Fig. 8. Alconpat mostra uma tendência para cerca de 20 referências médias (ou uma faixa entre 15 e 25) que é um número muito aceitável quando você considera que a produção citável em relação a artigos básicos ou de

pesquisa aplicada, e as revisões é em torno de 2/3 da produção total, Fig. 5. Como uma síntese modesta, a RA tem uma tendência positiva geral (caminhando para cima e de forma constante) em suas estatísticas modestas e poderia ser resumida no lento, mas constante aumento de seu fator de impacto, tabela 1. No fechamento desta publicação, o *feedback* do DOAJ já estava disponível, por isso é provável que, de acordo com os planos, a RA esteja se candidatando com possibilidades muito boas ao Scopus e JCR.

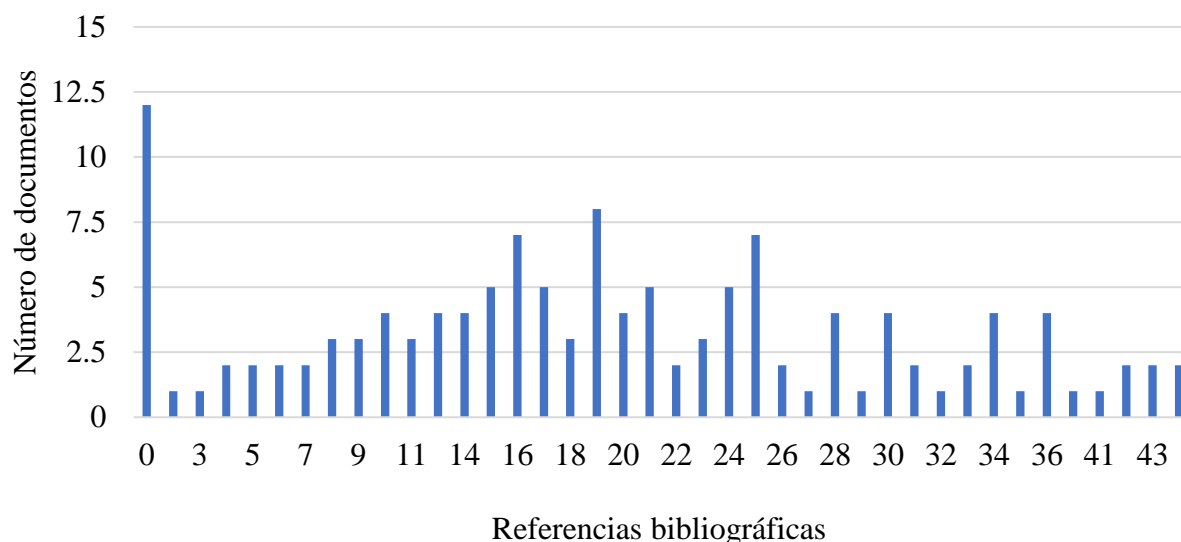


Figura 8. Distribuição de documentos por número de referências bibliográficas por artigo (Scielo Analytics)

O futuro da RA é encorajador e frutífero. Daqui a 10 anos, deve-se dar amplo reconhecimento ao órgão editorial original e àqueles que aderiram a essa iniciativa que levou a RA para onde está agora. Mas, sem dúvida, o maior reconhecimento é merecido pelos autores de artigos, que confiaram em RA e investiram tempo, dinheiro e esforço para publicar seus trabalhos de pesquisa aqui, embora muitos deles tenham tido melhores opções na época. Finalmente, leitores, sem eles RA não seria nada, um agradecimento especial por ler, baixar e citar. Sua preferência, sem dúvida, dará em um curto espaço de tempo, oportunidades para continuar melhorando através de melhores ferramentas para consulta e indexação. Em nome do Conselho Editorial muitos, muitos, muitos agradecimentos a todos. Durante 2021, e no encerramento desta edição, esses 10 anos foram homenageados com uma celebração acadêmica em 19 de maio. A programação desse ato, para fins de posteridade, está aqui incluída como tributo no anexo.

Agradecimentos especiais ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (CONACyT) do México, através do qual o apoio dos projetos foi tido (chamada 2013, declarada como revista nacional competente (2 de setembro de 2013), Chamada 2014 -2015, projeto nº 140028 (30 de outubro de 2014), Chamada 2016, declarada como revista internacional competente (05 de setembro de 2016), Chamada 2017 , projeto 290978 (21 de março de 2017) e a última Chamada 2018-2019, projeto 297368 (16 de julho de 2018) para financiar a Revista Alconpat em diversas etapas que lhe permitiram atingir padrões com os quais foi possível aplicar e obter índices importantes.

ANEXO

Programa de Celebração Acadêmica do 10º Aniversário da Revista Alconpat

- 09:00-09:10 Palavras de boas-vindas ao evento por Carmen Andrade (presidente de Alconpat)
- 09:10-09:40 Apresentação sobre a história e estatísticas da Revista, bem como planos imediatos e futuros (Pedro Castro Borges).
- 09:40-10:20 Conversa entre editores associados de forma descontraída sobre fatos, experiências, história e tópicos abertos. Raúl Husni e Manolo Fernández Cánovas coordenam. Participam Oladis Troconis de Rincón, Andrés A. Torres Acosta, Jorge Branco, Paulo Helene, Pedro Garcés Terradillos.
- 10:20-10:40 Apresentação e Reconhecimento ao Corpo Editorial que atuou nesses 10 anos, tanto aos ativos quanto aqueles que não estão mais na comissão (Patricia Martínez, Sergio Espejo, Margita Kliewer, Mauricio López e Luis Fernandez, entre outros), Coordena José Manuel Mendoza Rangel.
- 10:40-11:00 Apresentação de Novos Editores Associados da Revista (Ravindra Gettu de India y Filipo Uberttini de Italia) e Co-Editora Chefe, 2021-2022 (Edna Possan de Brasil). Coordena Pedro Castro Borges.
- 11:00-12:45 Apresentações curtas dos mais representativos "Review and Collection" (por tópico, citações, *downloads*) da Revista Alconpat representando a América do Norte e do Sul, África, Ásia e Europa. Coordena um membro do Comitê Editorial para cada trabalho (veja lista abaixo). Cada Apresentação é de 12 minutos e 3 minutos para apresentação inicial e perguntas.
- 12:45-12:55 Palavras de Paulo Helene, Editor Associado em Representação do Corpo Editorial.
- 12:55-13:00 Encerramento com e-brinde de honra, Pedro Castro

Artigos mais citados

2015

Integrated management systems building technique: inspection and repair of non-structural elements. **PORTUGAL** (42 REF). Chairman Pedro Garcés Terradillos.

G. T. Ferraz (IST, Lisboa; Portugal)

J. De Brito (Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa)

V. P. De Freitas (Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto)

J. D. Silvestre (IST, Lisboa; Portugal)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.83>

2017

Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art. **BRASIL** (75 REF). Chairman Raúl Husni.

Joaquim Humberto Aquino Rocha (Universidade de Pernambuco, Brasil)

Yêda Vieira Póvoas Tavares (Universidade de Pernambuco)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>

2018

Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. **SUDAFRICA** (57 REF). Chairman Andrés Torres Acosta.

Mark Gavin Alexander (University of Cape Town)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>

2019

Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review. **MEXICO** (67 REF). Chairlady Edna Possan.

Pedro J. Poot Cauich (Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Marista de Mérida, Periférico Norte tablaje catastral 13941, Carretera Mérida - Progreso. C.P. 97300, Mérida, Yucatán)

Rodolfo Martínez-Molina (Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Marista de Mérida, Periférico Norte tablaje catastral 13941, Carretera Mérida - Progreso. C.P. 97300, Mérida, Yucatán)

José Luis Gamboa Marrufo (Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Marista de Mérida, Periférico Norte tablaje catastral 13941, Carretera Mérida - Progreso. C.P. 97300, Mérida, Yucatán)

Pedro Jesus Herrera Franco (Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 # 130, Col. Chuburná, C.P. 97205, Mérida, Yucatán)

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

2020

Use of supplementary cementitious materials (SCMs) in reinforced concrete systems – Benefits and limitations. **INDIA** (39 REF). Chairman Iván Escalante

R. G. Pillai (Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India)

R. Gettu (Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India)

M. Santhanam (Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>

Fire impacts on concrete structures. A brief review. **BRASIL** (35 REF). Chairman Fernando Branco

Paulo Helene (Professor Titular da Escola Politécnica da USP, PhD Engenharia, São Paulo)

Carlos Brites (Pesquisador de Pós-Doutorado na Escola Politécnica da USP, Brites Consultoria, São Paulo)

M. Carvalho (Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.421>

Resenha da coleção sobre Resistividade de Carmen Andrade, Presidente Oladis Troconis

2011

La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **ESPAÑA** (14 REF)

C. Andrade (Centro de Investigación en Seguridad y Durabilidad de Estructuras y Materiales, CISDEM (CSIC-UPM), IETcc-CSIC, España)

R. D'Andrea (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones IECA- España)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>

2018

Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity. **ESPAÑA** (24 REF)

Carmen Andrade (International Center for Numerical Methods in Engineering. CIMNE. UPC)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>

2020

Rebar corrosion modelling and deterioration limit state. **ESPAÑA** (22 REF)

C. Andrade (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, España)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.478>