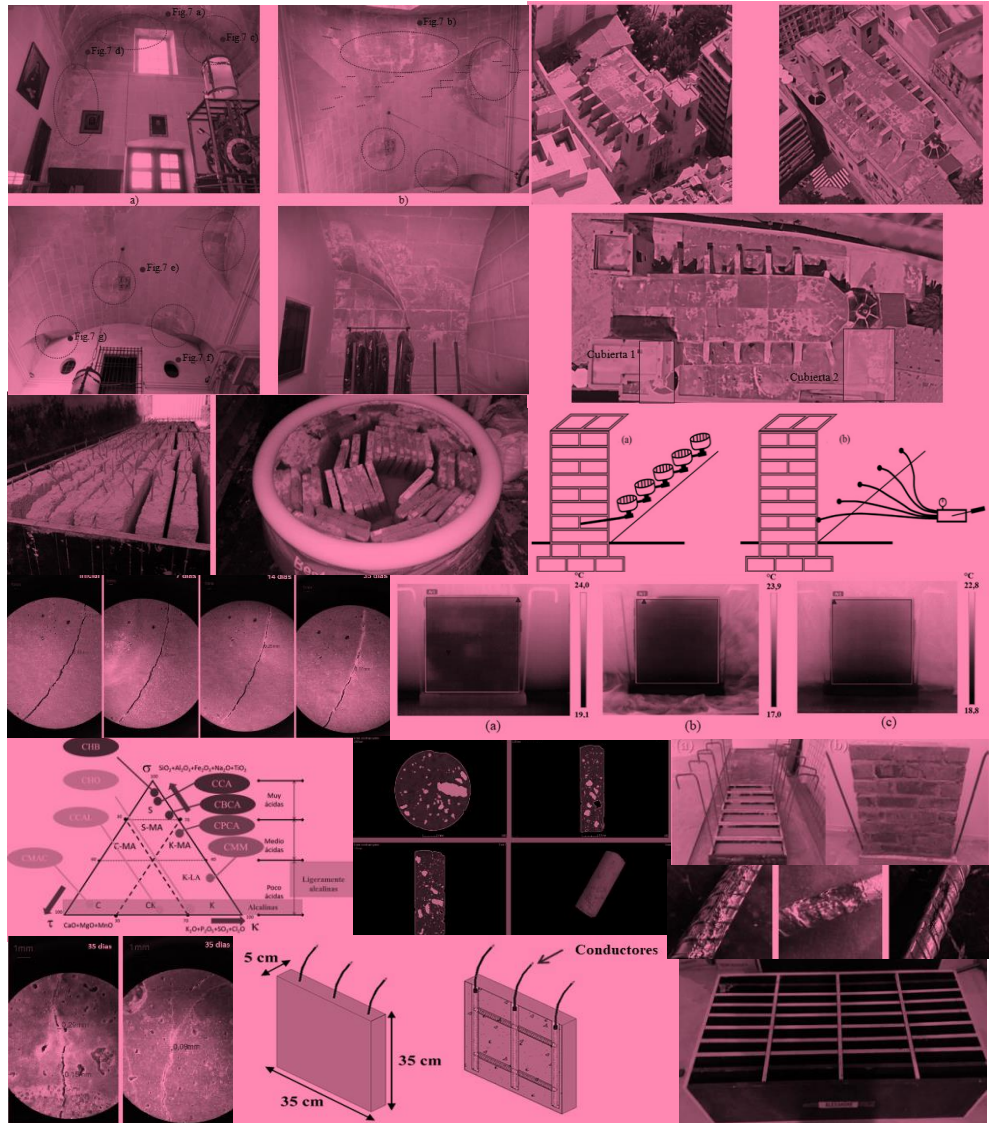
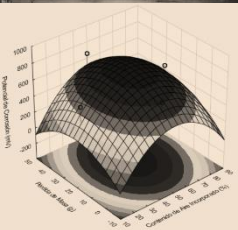
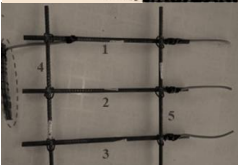




ALCONPAT Internacional

Membros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Diretor General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vice-presidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vice-presidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesoureiro

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

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

Revista ALCONPAT

Editor em Chefe:

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

Co-Editor em Chefe (2022-2023):

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

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernández Cánovas
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidade Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini

Universidad de Perugia,

Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,
Chennai, **India**

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

<http://www.revistaalconpat.org>

Com grande satisfação, apresentamos a segunda edição do décimo ano da Revista ALCONPAT.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é a publicação de contribuições de produtos de pesquisa básica ou aplicada diretamente relacionadas à solução de problemas relacionados ao controle de qualidade, patologia e recuperação de construções, com estudos de caso relacionados sendo bem-vindos nessas áreas.

Esta edição do V12N1 começa com um trabalho do **Brasil**, onde Emerson Félix e colegas apresentam uma investigação experimental com o objetivo de avaliar a influência da frequência dos esforços, do nível de tensão aplicada e da resistência à compressão do material no comportamento à fadiga de concreto. Os ensaios foram realizados considerando três frequências de carga (0,125, 0,25 e 0,5 Hz), dois níveis de tensões máximas (50% e 70% da resistência à compressão) e concretos com três classes de resistência à compressão (30, 50 e 70 MPa). Os resultados encontrados indicam que à medida que a frequência de carga aumenta, a vida em condições de fadiga aumenta exponencialmente. Porém, observou-se que a vida em condições de fadiga é menor em concretos com alta resistência à compressão, e apresenta relação inversa com a resistência à compressão do material.

No segundo trabalho, Jordi Payá e colegas da **Espanha** mostram que os cimentos de ativação alcalina (AAC) requerem um componente alcalino para a ativação do precursor. A fabricação do ativador alcalino (AA) envolve um consumo de energia e matéria-prima muito importante, de forma que a pegada de carbono dos AACs é fundamentalmente influenciada por este fator. Uma alternativa é o uso de outras disciplinas para a preparação de AA. Neste trabalho é realizada uma análise exaustiva das diferentes alternativas: materiais à base de sílica para a preparação de silicatos alternativos e materiais à base de alcalinos. As pegadas de carbono são comparadas aos cimentos Portland comerciais e o efeito da substituição dos reagentes comerciais por ativadores alternativos é analisado.

O terceiro artigo vem do **Brasil**, onde Fernanda Pacheco e colegas analisam o potencial de cura do concreto usando soluções químicas e bacterianas, avaliando diferentes materiais que podem ser usados para encapsulamento. Argila expandida e perlita foram usadas para encapsular os agentes. Para analisar a eficácia da cura, técnicas de análise visual foram realizadas usando um microscópio de luz de alta precisão e microtomografia 3D. Os resultados apontaram para um melhor desempenho da mistura BAC.AE (solução bacteriana encapsulada em argila expandida), utilizando uma solução bacteriana encapsulada em argila expandida, que foi capaz de cicatrizar fissuras de até 0,57mm. As misturas

BAC.PE (solução bacteriana encapsulada em perlita expandida), solução bacteriana encapsulada em perlita expandida, e SS (silicato de sódio), solução química adicionada no momento da mistura para substituir a água, cicatrizou trincas de 0,16 mm e 0,29 mm respectivamente.

No quarto artigo da **Brasil**, Rayara Pinto Costa e colegas avaliam a variabilidade na previsão da vida útil de estruturas de concreto por meio de quatro modelos que estimam o avanço natural da frente de carbonatação. Os resultados mostram que existe variabilidade na estimativa da frente de carbonatação. Os modelos de Possan (2010) e Eklou (2018) apresentam valores estimados próximos aos medidos, enquanto os de Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) subestimam e superestimam a frente natural de carbonatação. Foram considerados apenas os concretos sem adição de cimentantes suplementares, devido às limitações do modelo. A resistência à compressão, a concentração de CO₂ e a umidade relativa têm influência significativa nos resultados e a variabilidade depende dos parâmetros considerados nos modelos.

O quinto artigo, de Ronei Hoffmann Malaquias e colegas, vem do **Brasil** e analisa a atuação do tratamento da umidade ascendente em paredes, por meio da utilização de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrofóbicos disponíveis no mercado brasileiro, com sua introdução por gravidade. A avaliação da umidade ascendente foi realizada pelo cálculo da taxa de absorção de água nas amostras, combinada com as imagens obtidas pela câmera termográfica. A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que o tratamento não reduziu completamente a patologia nas paredes, porém, ambos os produtos obtiveram um bom desempenho, conseguindo reduzir consideravelmente as taxas de absorção de água.

O sexto trabalho desta edição é da autoria de Carlos Fernando Gomes do Nascimento e colegas do **Brasil**. Eles verificam se os vazios intensificam o desencadeamento da corrosão das armaduras em concreto aerado, utilizando lajes com massas leves específicas. A metodologia foi baseada em quatro testes: inspeção visual, potencial de corrosão, resistividade elétrica e perda de massa. Em relação à família L1, as famílias L2 e L3 (maior teor de ar) foram mais suscetíveis à corrosão das armaduras, bem como na quantidade de massa perdida das barras de aço em 90% dos casos. Porém, o comportamento de algumas lajes indica que existe a possibilidade de o processo ser assintomático em termos de manchamento, visto que foi verificada a influência da cobertura no processo de corrosão das barras de aço.

No sétimo trabalho, do **México**, Alberto Mena e Pedro Castro Borges apresentar a aplicação prática do fator de segurança (FS) na estratégia de reparo de pilares em um edifício de concreto armado com valor histórico (quase 70 anos). 80% de um prédio localizado no centro histórico da cidade de Campeche, no México, declarado Patrimônio da Humanidade pela UNESCO, foi reformado. Estratégias foram utilizadas para um melhor aproveitamento dos recursos materiais, equipamentos e mão de obra na reparação de paredes, pilares, lajes e vigas. Uma das estratégias foi utilizar o FS teórico para calcular a profundidade de reparo sem consequências estruturais, mas

cumprindo o objetivo de controlar a carbonatação do concreto, e manter a previsão de vida útil desejada.

No oitavo artigo, da **Espanha**, David Bru e Salvador Ivorra analisam o estado atual do telhado da Basílica de Santa María, Alicante, Espanha. Este edifício data do século 13 e está listado. Para a análise das eflorescências observadas é efectuada uma análise da tipologia da construção, bem como uma análise visual do estado da mesma, descrevendo as manifestações patológicas existentes, quer na zona exterior das coberturas, e na área interna dos quartos abaixo deles. Para a análise técnica de possíveis fugas da cobertura para as divisões interiores da basílica, é efectuado um ensaio de estanqueidade e verificação através do controlo da variação de temperatura por meio de análise termográfica. A existência e localização de vazamentos que danificaram este edifício listado podem ser concluídas.

A matéria que fecha a edição é de Zakaryaa Zarhri e colegas do **México**, que apresentam um estudo bibliométrico da literatura sobre o uso de borracha para pneus na construção civil para promover o interesse de usá-la como matéria-prima para reduzir a poluição global. Os trabalhos publicados no período de 1999-2020 nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) são considerados nos softwares Methodi Ordinatio e VOSviewer. Nesse período, foram publicados 967 documentos sobre o uso da borracha em concretos estruturais e não estruturais e 1182 autores contribuíram com o assunto. Desde 2010, tem aumentado o interesse dos pesquisadores em introduzir a borracha na construção. China, Estados Unidos e Austrália são os países com maior interesse em pesquisar o concreto-borracha.

Nesta edição, pela primeira vez, um cientista de destaque internacional falecido recentemente é homenageado com um "In Memoriam". Nesta ocasião, a seção "In Memoriam" é escrita por Carmen Andrade e Por José Bastidas em homenagem a José Antonio González. Tive que conhecer o José Antonio pessoalmente em 1993 no CNIM de Madrid, uma pessoa extremamente simples e de quem recordo momentos extremamente enriquecedores, um deles, que vou comentar aqui, foi na minha primeira visita, quando em forma espontânea, didática e enriquecedora, ele me deu uma aula pessoal de eletroquímica, mas com foco no método de Resistência à Polarização Linear. No final da aula, me deu seu livro autografado sobre o combate à corrosão. Sempre fui seu fã e desde então tenho os seus livros. Quem melhor do que Carmen Andrade e José Bastidas para falar da sua dimensão e grandeza escondida a través de uma humildade e simplicidade que hoje não é tão fácil encontrar. Convido você a curtir "In Memoriam".

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 disposição e esforço em apresentar artigos de qualidade e cumprir os prazos estabelecidos.

No início de 2022, devo agradecer amplamente à redação original e àqueles que aderiram a esta iniciativa que nos conduziu até onde estamos agora. Mas sem dúvida, o maior reconhecimento é merecido por nossos autores de artigos, que confiaram em nossa revista e investiram tempo, dinheiro e esforço para publicar seus trabalhos de pesquisa conosco,

apesar de muitos deles terem tido melhores opções em seu momento. O reconhecimento se estende aos nossos leitores, como você, que nos lê e cita o RA internacionalmente.

Em nome do Conselho Editorial



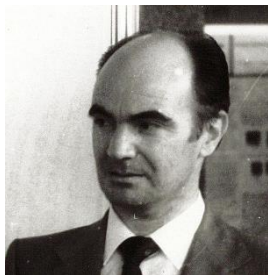
Pedro Castro Borges

Editor in Chief

EM MEMÓRIA DE

José Antonio González Fernández

(1937–2021)



José Antonio González Fernández (1937–2021), deixou-nos em maio de 2021 após uma vida fecunda e excelente carreira científica dedicada à pesquisa e à formação de pesquisadores. Grande professor e melhor pessoa, pesquisador incansável que tem dedicado todo o seu conhecimento e esforço ao avanço do conhecimento científico. Somos um dos primeiros e o mais recente de seus alunos.

No meu caso (Carmen) conheci José Antonio no CENIM depois de entrar em contato com Sebastián Feliu. Eu tinha acabado de ingressar no Instituto Eduardo Torroja onde iria desenvolver minha Tese de Doutorado sob a direção de José Calleja, Chefe do Departamento de Química. Foi Calleja quem me sugeriu como primeiro tema para estudar a corrosão da armadura, visto que já tinha escrito alguns trabalhos que lhe pareciam de enorme importância. Quando aceitei, ele imediatamente sugeriu que eu visitasse o Dr. Feliu, Chefe do Departamento de Corrosão do CENIM, que me encaminhou para o curso que estava ministrando para o doutorado no departamento de Metalurgia da Universidade Complutense. José Antonio estava então na Alemanha se especializando em corrosão em alta temperatura. Quando ele voltou ao laboratório alguns meses depois, Feliu indicou que ele seria aquele a quem eu deveria dirigir minhas perguntas. Assim, iniciamos uma colaboração frutífera naqueles primeiros anos, até que no início dos anos 2000 minhas responsabilidades como presidente de organismos internacionais me impediram de continuar a relação estreita que mantínhamos por mais de duas décadas. Tivemos que começar a

dirigir teses separadamente e, assim, continuar nos mesmos tópicos, mas por caminhos paralelos.

No meu caso (David), tive o privilégio de aprender com José Antonio tudo sobre Corrosão em Estruturas de Concreto Armado. Sua excelência científica, paixão e vocação foram adjetivos que o acompanharam e o distinguiram ao longo de sua exemplar carreira científica. Agradeço também a José María Bastidas pela formação e rigor científico, que é um exemplo de excelência em pesquisa na escola Jose Antonio. Durante a minha passagem pelo Cenim com o José Antonio, fomos os pioneiros no estudo dos mecanismos de corrosão e passividade de armaduras de aço embutidas em cinzas volantes, estudo que teve grande impacto no avanço do conhecimento da corrosão de estruturas de concreto armado. por sua visão na aplicação de geopolímeros como materiais cimentícios. Além disso, você poderá aprender com José Antonio os fundamentos da aplicação de pulsos galvanostáticos / potenciostáticos para a determinação da resistência de polarização através da constante de tempo do processo de relaxação para avaliação da taxa de corrosão em estruturas de concreto armado. Tive o prazer de acompanhá-lo a Nashville, TN (EUA), onde José Antonio foi premiado por ocasião do reconhecimento recebido pela NACE International com o Prêmio Frank Newman Speller em 2007, prêmio de mérito pelo qual foi distinguido a sua contribuição para o estudo, diagnóstico e prevenção da corrosão em estruturas de betão armado. Em memória de José Antonio e em homenagem a ele, no próximo ano de 2022, organizado pela Associação de Proteção e Desempenho de Materiais (AMPP) e presidido conjuntamente com Nick Birbilis, acontecerá um Simpósio Especial sobre Corrosão de Estruturas de Concreto Armado. Dentre as grandes virtudes de José Antonio, destacou sua grande capacidade e generosidade na formação de novos pesquisadores. O seu grande talento tem sido um excelente exemplo para todos nós e uma fonte de inspiração, que sempre transmitiu pelo lado do esforço e da tenacidade, sem os quais a reação não alcançaria o seu equilíbrio.

José Antonio esteve sempre disponível para os seus colaboradores e foi um trabalhador incansável,

obstinado e com muito amor próprio. Pessoalmente, tinha um humor muito reservado, às vezes difícil de compreender, mas sempre preciso, oportuno e inteligente.

As grandes contribuições de José Antonio para a ciência da corrosão têm se destacado pelo seu alcance internacional, onde cultivou extensas e estreitas relações que contribuíram para a formação de grandes pesquisadores no âmbito internacional, sendo uma referência em países ibero-americanos. Sempre, do Departamento de Corrosão do CENIM (CSIC), onde se aposentou há alguns anos. Além de seus estudos sobre o aço inoxidável, que posteriormente estendeu ao caso dessa armadura de metal em concreto, suas contribuições no uso de técnicas eletroquímicas são muito importantes. Entre eles, devemos citar o trabalho com Feliu, Fulla e Andrade na aplicação da medição da Resistência à Polarização (Rp) tanto em ácido sulfúrico / chumbo quanto em concreto, ambos resultando em imediato reconhecimento internacional, em poucos anos nos quais O uso desta forma de medir a taxa de corrosão foi altamente questionado. A verificação gravimétrica das perdas eletroquímicas, uma verificação importada de estudos de corrosão atmosférica onde apenas as perdas de peso são medidas, foi um marco crucial para dar um passo gigantesco na demonstração da confiabilidade da técnica. A extensão do uso da técnica Rp para grandes estruturas de concreto se deve a um impulso inicial de Feliu, que conseguiu resolver as equações matemáticas envolvidas e foi quem sugeriu o uso de anel de guarda, mas essas ideias não teriam sido possível sem o trabalho incansável de José Antonio, entre outros, produzir um corrosímetro portátil para medir a taxa de corrosão com a empresa Geocisa e o Instituto Torroja, que ainda é o mais preciso dos comercializados hoje.

No concreto, José Antonio estudou diligentemente muitos aspectos da corrosão da armadura, como o efeito da temperatura, o uso de inibidores, a aplicação de impedância eletroquímica, o uso de reforço de aço inoxidável, a re-alkalinização e a extração de cloretos. E um longo etc. . Em outras áreas contribuiu nas áreas do Departamento de Corrosão, como a passivação do aço inoxidável em

meio ácido, a do alumínio e sua anodização, ou a corrosão atmosférica.

É muito notável os livros que escreveu sobre vários tópicos de corrosão, o uso de técnicas eletroquímicas ou a corrosão de armaduras. Esses livros são um testemunho de sua habilidade de ensino e de sua meticulosidade e rigor.

Por seu trabalho, ele recebeu, entre outros, o NACE “Frank Newman Speller Award” em 2007 por sua valiosa contribuição para o monitoramento da corrosão, diagnóstico e prevenção de estruturas de concreto armado”. Ele escolheu como palestra o tema “Predição da durabilidade da estrutura de concreto armado por técnicas eletroquímicas”, publicado em Corrosion 63, 9 (2007): p. 811-818.

Acompanhante com viagens a congressos, longas horas medindo potenciais e correntes em laboratório e intermináveis discussões científicas, descanse em paz. Os vossos ensinamentos servirão por várias gerações que vos devem homenagem pela vossa vocação de investigação, intuição científica, capacidade de conceber ensaios complexos, rigor na análise dos resultados e acima de tudo dedicação, muita dedicação a todos os seus colaboradores.

Em memória de José Antonio González, grande entre os grandes, obrigado por todos os saberes e saberes que nos ensinou e nos transmitiu. Sentiremos muito a sua falta. Que esta memória sirva para expressar nossas mais sinceras condolências a toda sua família, sua esposa Mari Luz, seu filho José Severo e suas filhas Paloma, Mari Nieves e Susana.

Por Carmen Andrade* y David M. Bastidas**

* Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) - Madrid- Espanha

** Centro Nacional de Educação e Pesquisa em Desempenho de Corrosão e Materiais, NCERCAMP-UA, Departamento de Engenharia Química, Biomolecular e de Corrosão, Universidade de Akron, Estados Unidos



CONTENIDO

PESQUISA BÁSICA

Página

Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E.: Vida útil à fadiga do concreto: Estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material.

1 - 15

Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M.: Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos.

16 – 31

Pacheco, F., Loeff, A., Müller, V., Ehrenbring, H. Z., Christ, R., Modolo, R. C. E., Oliveira, M. F., Tutikian, B. F.: Análise da autorregeneração de matrizes cimentícias através de diferentes métodos de inserção de soluções químicas e bacterianas.

32 – 46

Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M.: Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação.

47 – 60

Malaquias, R. H., Bruschi, G. J., Brisotto, D. S.: Análise de desempenho de bloqueadores químicos por gravidade no tratamento de umidade ascendente em paredes de alvenaria.

61 – 75

Nascimento, C. F. G., Demétrio Filho, A. A., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Neves, D. C. M., Monteiro, E. C. B.: Influência do índice de vazios do concreto celular na corrosão das barras de aço.

76 – 97

CASO DE ESTUDIO

Briceño-Mena, J. A., Castro-Borges, P.: Uso prático do fator de segurança na estratégia de reparo de pilar em um edifício de concreto com valor histórico.

98 – 109

Bru, D., Ivorra, S.: Estudo termográfico das manifestações patológicas devidas à umidade e do estado de conservação da cobertura da Basílica de Santa Maria.

110 – 126

PESQUISA DOCUMENTAL

Zarhri, Z., Rosado Martinez, W., Dominguez Lepe, J., Vega Azamar, R. E., Chan Juarez, M., Pamplona Solis, B.: 30 anos de investigações sobre concreto com adição de borracha (1990-2020). Uma análise bibliométrica.

127 – 142

Vida útil à fadiga do concreto: Estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material

E. F. Felix^{1*} , R. Carrazedo¹ , E. Possan² 

* Autor de Contato: emerson.felipe.felix@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.562>

Recepção: 31/10/2021 | Aceitação: 07/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma investigação experimental com objetivo de avaliar a influência da frequência de carregamento, intensidade da carga e resistência à compressão do material, no comportamento à fadiga do concreto. Ensaios foram realizados considerando três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz), dois níveis de tensão máxima (50% e 70% da resistência à compressão) e concretos com três classes de resistência (30, 50 e 70 MPa). Os resultados encontrados apontam que à medida que a frequência de carregamento é aumentada, a vida útil à fadiga cresce exponencialmente. No entanto, observou-se que a vida útil à fadiga é menor em concretos de alta resistência e que a VUF apresentou uma relação inversa com a resistência à compressão.

Palavras-chave: concreto; compressão cíclica; fadiga; fadiga de baixo ciclo; vida útil à fadiga.

Citar como: Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2022), "*Vida útil à fadiga do concreto: Estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material*", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. x-x, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.562>

¹ University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, Brasil.

² Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Felix, E. F. contribuiu com a atividade de concepção e redação do texto (100%), experimentação (100%), coleta de dados (100%) e discussão dos resultados (50%). Carrazedo, R. contribuiu com a atividade de aquisição de fundos para a pesquisa (100%), supervisão (100%), discussão dos resultados (25%) e correção do texto (50%). Possan, E. contribuiu com a atividade discussão dos resultados (25%) e correção do texto (50%).

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Fatigue life of concrete: Experimental study on the influence of loading conditions and material strength

ABSTRACT

This work presents an experimental investigation aiming to evaluate the influence on the concrete fatigue behavior regarding the loading frequency, load intensity and the material's compressive strength. Tests were carried out considering three loading frequencies (0.125, 0.25 and 0.5 Hz), two levels of maximum stress (50% and 70% of the compressive strength) and concretes made with three different compressive strength (30, 50 and 70 MPa). The results point out that as the loading frequency is increased, the fatigue life increases exponentially. However, it was observed that the fatigue life is shorter in high-strength concretes, i.e., the fatigue life presented an inverse relationship with the compressive strength.

Keywords: concrete; cyclic compression; fatigue; low cycle fatigue; fatigue life.

Vida de fatiga del hormigón: estudio experimental sobre la influencia de las condiciones de carga y la resistencia del material

RESUMEN

El presente trabajo presenta una investigación experimental con el objetivo de evaluar la influencia de la frecuencia de los esfuerzos, el nivel de tensión aplicada y la resistencia a la compresión del material sobre el comportamiento a fatiga del hormigón. Los ensayos se realizaron considerando tres frecuencias de carga (0,125, 0,25 y 0,5 Hz), dos niveles de tensión máxima (50% y 70% de la resistencia a la compresión) y hormigones con tres clases de resistencia a la compresión (30, 50 y 70 MPa). Los resultados encontrados indican que a medida que aumenta la frecuencia de carga, la vida en condiciones de fatiga aumenta exponencialmente. Sin embargo, se observó que la vida en condiciones de fatiga es menor en los hormigones de alta resistencia a la compresión, y presenta una relación inversa con la resistencia a la compresión del material.

Palabras clave: hormigón; compresión cíclica; fatiga; fatiga de bajo ciclo; vida de fatiga.

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

Estruturas de concreto, são geralmente projetadas diante da hipótese de que as cargas que atuarão ao longo de sua vida útil serão estáticas e que os elementos estruturais trabalham em regime elástico linear (ou com baixo nível de danificação). Entretanto, solicitações cíclicas como a ação do vento, as ondas de marés, os abalos sísmicos, os efeitos de temperatura e outras cargas flutuantes (como o tráfego de veículos em uma ponte), podem levar à falha da estrutura sob níveis de tensões abaixo dos estabelecidos em projeto, e isto ocorre devido ao fenômeno da fadiga (Lü et al., 2004; Saini e Singh, 2020).

A fadiga se refere a deterioração ou ruptura de um sólido quando submetido à repetidas cargas e descargas, e ocorre devido à degradação permanente e progressiva na microestrutura do material, para solicitações cíclicas de magnitude inferior à sua resistência (Saini e Singh, 2020). Assim, a fadiga é um fenômeno que deve ser considerando no projeto de elementos que trabalham sob ação de cargas cíclicas, a fim de que os danos permanentes que comprometem a integridade estrutural sejam minimizados.

De modo geral, o nível de tensão, que age no material, é de suma importância na análise e determinação da resistência à fadiga, ou vida útil (número de ciclos N , resistido antes da ruptura). O número N , pode ser descrito através da curva de Wöhler, ou curva S_xN “Stress vs. Number”, que relaciona o nível de tensão aplicado ao número de ciclos que causam a ruptura no material. Para a maioria dos materiais, a curva de Wöhler mostra a existência de uma tendência na redução do número de ciclos à medida em que aumenta o nível de tensão (Dowling, 2012).

Atualmente, apenas os materiais dúcteis, como os aços e as ligas, apresentam ábacos e curvas de Wöhler bem definidas. Para o concreto e outros materiais frágeis e quase-frágeis, ainda não existem curvas definidas para todas as classes e tipos, uma vez que o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à fadiga só ganhou destaque no decorrer das duas últimas décadas, ao passo em que os estudos correlatos às áreas de durabilidade, mecânica da fratura e mecânica do dano tiveram substancial avanço.

No que diz respeito ao desempenho do concreto quando submetido a cargas cíclicas, trabalhos vêm sendo desenvolvidos por estudos teóricos, experimentais e/ou numéricos, e divididos quanto ao tipo de fadiga analisada, fadiga por tração (Subramaniam e Shah, 2003; Chen, et al., 2017), tração-compressão (Lü et al., 2004), compressão (Xiao et al., 2013; Lantsoght et al., 2016; Jiang et al., 2017) e flexão (Kim et al., 2013; Arora e Singh, 2016; Kasu et al., 2019; Saiani e Sinsh, 2020). A maioria das pesquisas encontradas na literatura têm como objetivo a avaliação da fadiga à flexão, onde as tensões de tração são preponderantes.

No Brasil, por exemplo, as pesquisas são prioritariamente relacionadas à fadiga por flexão em vigas ou compressão e flexão em pavimentos de concreto, sendo a maioria de cunho numérico ou teórico-numérico (Baroni, 2010; Junges, 2017; Mascarenhas e Carvalho, 2019).

A principal dificuldade encontrada para o estudo experimental do comportamento do concreto à fadiga, no Brasil, remete-se à incipiência de equipamentos capazes de realizar ensaios cíclicos com alta velocidade de carregamento. Medeiros (2012), por exemplo, realizou parte de sua pesquisa no exterior, devido a indisponibilidade, na época, de máquinas e equipamentos de laboratório para ensaios de fadiga à compressão. O autor analisou experimentalmente o ganho de resistência à fadiga devido a incorporação de fibras na matriz cimentante do concreto, verificando ainda, a influência de distintas frequências de carregamento.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento à fadiga do concreto, a fim de analisar a vida útil à fadiga (VUF) de concretos de baixa (30 MPa), e alta (50 e 70 MPa) resistência à compressão, submetidos à diferentes condições de carregamento. O estudo experimental foi desenvolvido considerando a compressão cíclica, onde os ensaios foram realizados pela combinação de três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz) e dois níveis

de tensão máxima (50% e 70% da resistência à compressão).

2. FADIGA NO CONCRETO

2.1 Degradação do material devido a cargas cíclicas

Em corpo sujeito a cargas cíclicas, nucleações em nível microscópico são originadas com um baixo número de repetições devido ao efeito da fadiga no material. A progressão das fissuras até a sua observação em nível macroscópico é lenta, se considerada a vida útil à fadiga do sólido, usualmente expressa pelo número de ciclos necessário para causar a falha do material (N_f).

A vida útil à fadiga (VUF) é geralmente classificada em dois estágios: um referente ao surgimento das nucleações no material e outro à propagação das fissuras. No período de iniciação também é observado o crescimento microestrutural de fissuras, porém em dimensões tão insignificantes que não são consideradas na representação ou quantificação do nível de danificação do material. Já o período de propagação, pode ser caracterizado pelo período que remete ao desenvolvimento das fissuras em nível mesoscópico. A Figura 1 apresenta as diferentes fases que configuram a vida útil à fadiga, considerando aspectos relacionados à fissuração dos materiais.

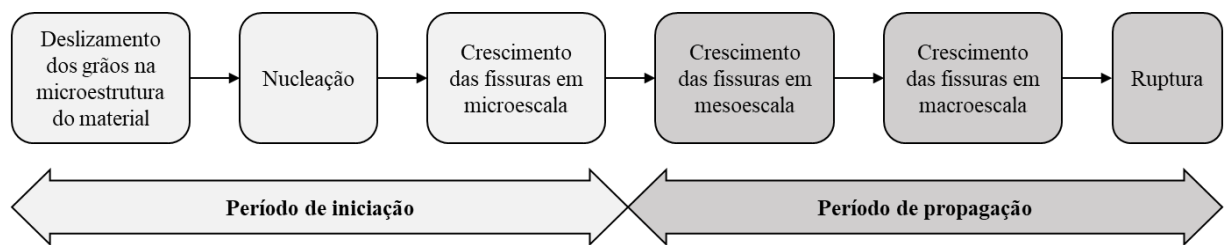


Figura 1. Fases da VUF associadas à fissuração do concreto.

Do surgimento da primeira microfissura até a ruptura do material, o dano por fadiga no concreto pode ser caracterizado em três estágios (Figura 2): (i) origem da fissura, que é quando as microfissuras surgem devido à alta concentração de tensões em pontos de discontinuidades na estrutura cristalina ou, em regiões com discontinuidades pré-existent no material; (ii) propagação da fissura, devido ao acúmulo de energia nas extremidades das fissuras existentes; e (iii) ruptura do material, que ocorre de maneira abrupta, devido à natureza quase-frágil do material.

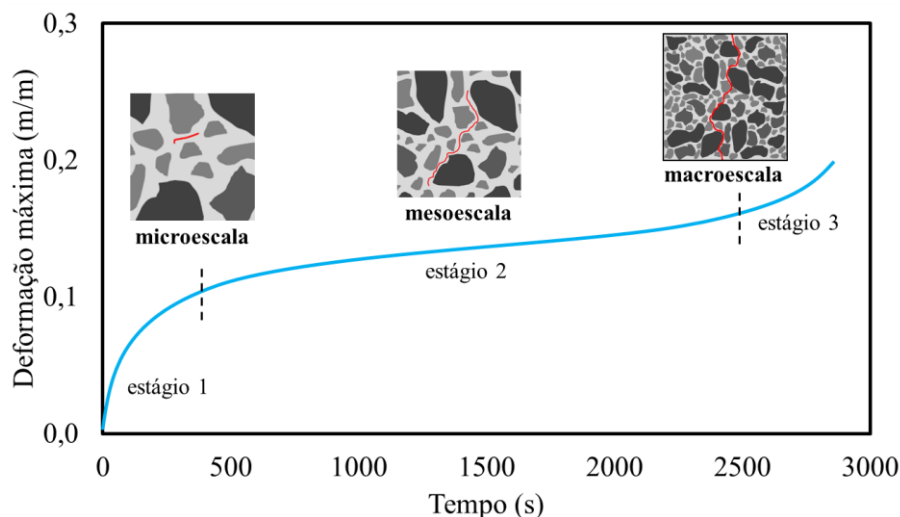


Figura 2. Avanço de fissuras no concreto em função da deformação máxima e do tempo de ensaio em corpos de prova submetidos à carga cíclica.

Para prever ou monitorar a vida útil de um elemento de concreto quando sujeito à fadiga, faz-se necessário conhecer o comportamento mecânico do material quando submetido à ciclos de carga e descarga. As propriedades do concreto referentes à fadiga são determinadas a partir de ensaios laboratoriais, onde os dados obtidos são geralmente apresentados por meio do gráfico de tensão ou de deformação específica em função do número de ciclos até a ruptura, curva S-N e ε -N, respectivamente.

Existem na literatura diversos modelos de previsão da vida útil do concreto quando submetido à fadiga, conforme apresentado nas Equações (1)-(3) (Wöhler, 1960; Raithby e Galloway, 1974; Tepfers e Kutti, 1979). Entretanto, boa parte dos modelos possuem como diretriz as curvas S-N ou ε -N, obtidas em campanhas experimentais, às quais só atendem a um pequeno número de casos, o que inviabiliza o seu emprego de forma generalizada.

$$\frac{S_{max}}{f_{t,f}} = d + e \log(n) \quad (\text{WÖHLER, 1960}) \quad (1)$$

$$\log(N) = 13,275 - 11,39 \left(\frac{S_{max}}{f_{ck}} \right) \quad (\text{RAITHBY; GALLOWAY, 1974}) \quad (2)$$

$$\frac{S_{max}}{f_{est}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log(N) \quad (\text{TEPFERS; KUTTI, 1979}) \quad (3)$$

onde S_{max} é a tensão máxima aplicada, $f_{t,f}$ é a resistência à tração na flexão estática do concreto, N é o número de ciclos para o colapso do material, d e e são parâmetros do material obtido por regressão dos dados, R é a razão entre a tensão mínima e máxima, f_{est} é a resistência característica do concreto, f_{est} é a resistência em análise (tração, compressão ou flexão) ou tração estática do concreto.

De acordo com Lee e Barr (2004), são muitos os motivos que inviabilizam o uso da curva de Wöhler (Equação (1)) de forma generalizada, sendo a principal, a determinação dos parâmetros por meio da regressão de dados, uma vez que existe uma dispersão considerável nos resultados de ensaios de fadiga no concreto, considerando amostras do mesmo lote, sob as mesmas condições de ensaio.

Ortega et al. (2018) relatam que a grande dispersão nos resultados é decorrente da sensibilidade da resistência à fadiga a uma variedade de parâmetros relacionados ao ensaio e ao material, que são quase impossíveis de serem controlados de maneira precisa, como as condições de moldagem, o alinhamento do corpo de prova no equipamento de ensaio, a imposição das tensões máximas e mínimas, a frequência de carregamento e o posicionamento dos extensômetros ou Strain Gauges.

2.2 Fatores intervenientes na vida útil à fadiga

O estudo da fadiga no concreto, teve suas primeiras publicações em meados da década de 1920, com o trabalho de Clemmer (1922), onde foi observado que o concreto possui um comportamento distinto ao do aço, quando submetido a carregamento cíclico, observando que este mecanismo de degradação estava correlacionado aos princípios da mecânica da fratura.

Ao longo dos últimos cem anos, após a publicação dos primeiros trabalhos, muitos estudos de fadiga no concreto foram desenvolvidos, sendo a maioria (até a década de 90) referentes à determinação de um modelo geral, que considerasse os distintos tipos de ensaios à fadiga: tração direta, tração na flexão, tração por compressão, compressão e tração-compressão alternada.

De acordo com Medeiros (2012), o modo de carregamento influencia o comportamento do concreto à fadiga, uma vez que são distintos os fatores que governam o mecanismo de ruptura do concreto

na compressão, tração ou flexão. Ademais, sabe-se que outros parâmetros podem influenciar na resistência à fadiga e vida útil, como os materiais constituintes, condições de umidade, relação entre tensões mínima e máxima (R), frequência de carregamento, entre outras.

Raithby e Galloway (1974) analisaram a influência das condições de umidade na determinação do número de ciclos até a ruptura do concreto convencional. Os autores analisaram as condições do concreto saturado, concreto seco ao ar por uma semana (Equação (2)) e concreto seco em forno por uma semana. Os resultados encontrados foram coincidentes com os observados por Cornelissen e Lewis (1986), onde o concreto saturado apresenta vida útil inferior ao do concreto seco ao ar, mas praticamente a mesma que o concreto seco em forno.

Tepfers e Kutti (1979) propuseram modelos para a determinação da vida útil de concretos submetidos à fadiga por compressão, tração e flexão, verificando por meio de análises estatísticas, que a Equação (3) atende aos diferentes tipos de carregamento. Entretanto, Cornelissen (1984) apresentou um estudo demonstrando que o modo de carregamento tem influência no comportamento do concreto à fadiga, indicando que um único modelo não representaria adequadamente o fenômeno para os diferentes tipos de carregamentos. Ademais, Cornelissen (1984) e Zhang et al. (1996) verificaram que os ensaios alternados causam maior redução na resistência à fadiga do que aqueles puramente em tração na flexão.

No que se refere aos materiais constituintes, ainda não se chegou a um consenso quanto a influência da relação água/cimento (a/c) e do consumo de cimento, os estudos de Tepfers e Kutti (1979) e Zhang et al. (1997) mostram que estes parâmetros são indiferentes ao comportamento do concreto submetido à fadiga por tração ou flexão, afetando apenas a resistência estática do material.

Quanto ao tipo de agregado empregado, Sparks (1982) mostrou que existe uma forte correlação entre a taxa de deformação secundária e o número de ciclos até a ruptura do concreto, fazendo com que concretos produzidos com agregado leve tenham uma menor vida útil, quando comparados aos concretos com agregado convencional (agregados de origem basáltica ou granítica).

Por fim, sabe-se que frequência de carregamento (f) pode exercer grande influência no comportamento à fadiga do concreto, e mais, que ao se elevar a frequência, a vida útil à fadiga aumenta. Porém, a maioria dos trabalhos existentes na literatura, que corroboram com essa afirmação, foram desenvolvidos para altas frequências ($f > 1,0$) e para tensões máximas variando entre 75% e 95% da resistência estática (Zhang et al., 1996). Jansen (1996) observou que para tensão máxima menor que 75% da resistência estática do concreto, as frequências entre 1 e 15 Hz apresentam pequena influência na resistência à fadiga, e mais, que uma redução de 100 vezes na frequência resulta numa redução de 10 a 30 vezes no número de ciclos.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada neste trabalho é definida em cinco etapas, cujo objetivo centra-se na avaliação da vida útil à fadiga de corpos de prova cilíndricos submetidos à compressão cíclica.

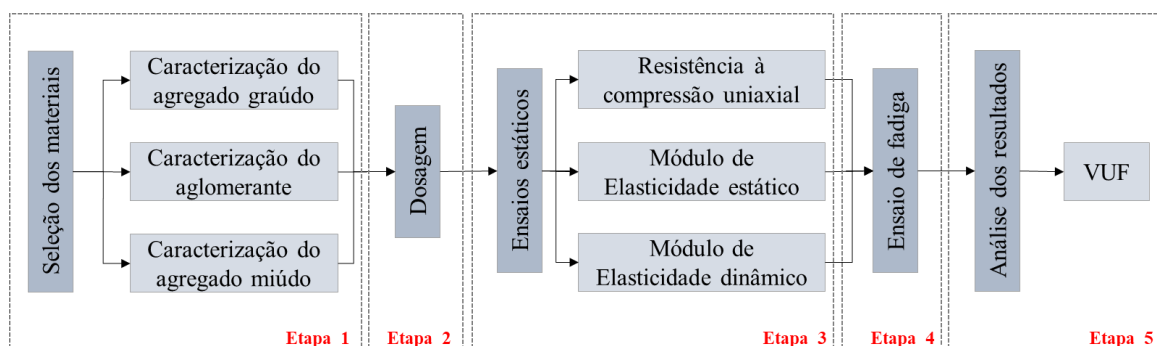


Figura 3. Metodologia do trabalho.

As cinco atividades desenvolvidas no trabalho são apresentadas na Figura 3, e referem-se à: i) seleção e caracterização dos materiais; ii) dosagem e moldagem dos concretos; iii) ensaios para definição de propriedades mecânicas do material; iv) ensaio de fadiga à compressão; e (v) análise dos resultados obtidos. Cada uma destas atividades é descrita detalhadamente a seguir.

3.1 Seleção e caracterização dos materiais

Neste estudo, para a produção dos concretos, empregou-se como aglomerante o cimento Portland CP II Z 32, composto com pozolana e com 32 MPa de resistência à compressão. A massa específica ($3,06 \text{ g/cm}^3$) e a área superficial específica ($3965,00 \text{ cm}^2/\text{g}$) deste cimento foram determinadas de acordo com a NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente.

Areia quartzosa e brita 0 de origem basáltica foram empregadas como agregados miúdo e graúdo, respectivamente. Para a caracterização dos agregados (Tabela 1), foram realizados os ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção de água e módulo de finura.

Quanto à composição granulométrica do agregado miúdo, verificou-se que os dois lotes analisados se encaixam dentro dos limites granulométricos recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para areia fina. Em relação aos agregados graúdos, os resultados comprovaram a dimensão máxima característica de 9,5 mm, correspondente a brita 0.

Tabela 1. Caracterização física dos agregados.

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Normas utilizadas
Massa unitária (kg/m^3)	1390,00	1401,00	(NBR NM 45: 2006)
Massa específica (kg/m^3)	2520,00	2590,00	(NBR NM 53: 2003)
Absorção (%)	0,22	1,45	(NBR NM 53, 2003)
Módulo de finura	1,46	-	(NBR NM 248 2003)

Para os concretos de classe C50 e C70, foram necessários empregar aditivos superplastificantes, que são compostos de polímeros orgânicos, comumente empregados como redutores de água, que possibilitam a redução do fator água/cimento e para dispersar partículas de cimento, melhorando assim a fluidez dos traços.

Por fim, relata-se que em todas as concretagens foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento local, sendo dispensável o controle de sua aceitação.

3.2 Dosagem e produção dos concretos

Para a definição do programa experimental, foram produzidos concretos considerando três diferentes composições, sendo uma para um concreto convencional de baixa resistência, com resistência característica à compressão igual a 30 MPa (C30) e dois para concretos de alta resistência, com 50 (C50) e 70 MPa (C70).

Para a dosagem, utilizou-se o método da ABCP (Rodrigues, 1984) com abatimento fixado em (120 ± 20) mm. Foram feitas dosagens iniciais para que a composição dos materiais proporcionasse concretos com as resistências almejadas. Na Tabela 2 são apresentados os consumos de materiais para cada um dos traços produzidos.

Ao todo, foram produzidos 126 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo 42 corpos de prova para cada um dos três lotes. Os concretos foram moldados em mesa vibratória e submetidos à cura com temperatura e umidade controladas até o instante de realização dos ensaios, aos 28 e 90 dias.

Tabela 2. Consumo de materiais.

Material	Consumo de material em kg/m ³		
	C30	C50	C70
Cimento (CP II Z 32)	353,96	395,55	553,43
Agregado miúdo	800,44	1000,76	853,92
Agregado graúdo	1023,68	819,96	826,75
Água	184,19	166,37	168,92
Aditivo	-	2,38	4,41
Relação água/cimento	0,52	0,42	0,30

3.3 Ensaios com carregamentos estáticos

Para os ensaios de caracterização dos concretos com carregamento estático, foram utilizados dezoito corpos de prova, sendo seis empregados nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, seis aos 28 dias, seis para análise da resistência e determinação do módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 90 dias (período em que ocorreram os ensaios de compressão cíclica). Os ensaios foram conduzidos de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 8522 (ABNT, 2017) e ASTM E1876 (2015).

O módulo de elasticidade dinâmico foi considerado neste trabalho, por ser uma propriedade que representa o comportamento do concreto quando submetido a cargas dinâmicas. Os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico foram realizados por meio da técnica de excitação por impulso (TEI), uma técnica não destrutiva, a qual permite que o corpo de prova seja empregado em outro ensaio. Este ensaio foi realizado com o propósito de determinar a variação do módulo de elasticidade e o dano correspondente, avaliado durante a realização do ensaio de fadiga.

O módulo de elasticidade dinâmico e seu respectivo módulo estático, obtido via formulação de Popovics (2008) (Equação (4)), foi mensurado em seis corpos de prova antes do início dos ensaios de resistência à compressão aos 90 dias.

$$E_c = 0,107 E_d^{1,4} \rho^{-1} \quad (4)$$

onde E_c é o módulo de elasticidade estático (em Pa), ρ é a densidade do concreto (em kg/m³), E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (em Pa).

3.4 Ensaios de fadiga

Para a realização dos ensaios de fadiga, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, submetidos à compressão cíclica em uma máquina servo hidráulica Instron 8805 de capacidade máxima de ± 1500 kN. A escolha dos corpos de prova foi realizada buscando uma dimensão com que a velocidade máxima de carregamento usada nos ensaios fosse inferior à velocidade máxima suportada pela máquina (80 kN/s) e que ainda representasse adequadamente o comportamento do material. Como justificativa para a dimensão do corpo de prova, indica-se o estudo experimental realizado por Saini et. al. (2015), onde foi observado que para a fadiga à compressão, o diâmetro do corpo de prova possui influência superior à relação altura/diâmetro do corpo de prova e que um diâmetro igual ou superior a 5 cm é suficiente para avaliar e/ou ensaiar corpos de prova de concreto sob compressão cíclica. Saini et. al. (2015) relatam ainda, que deve ser utilizado um corpo de prova que apresente uma relação entre diâmetro do corpo de prova e diâmetro máximo do agregado superior à 5,00.

A máquina servo-hidráulica utilizada possui controle eletrônico que recebe sinais analógicos de até seis canais diferentes, seja carga, deslocamento ou leitura proveniente de um extensômetro qualquer. A Figura 4.a mostra uma visão geral da posição dos dois extensômetros do tipo roseta

dupla (com direções variando em 90°) e dois LVDT, utilizados nos corpos de prova. Já na Figura 4.b é apresentado o esquema de carregamento cíclico empregado.

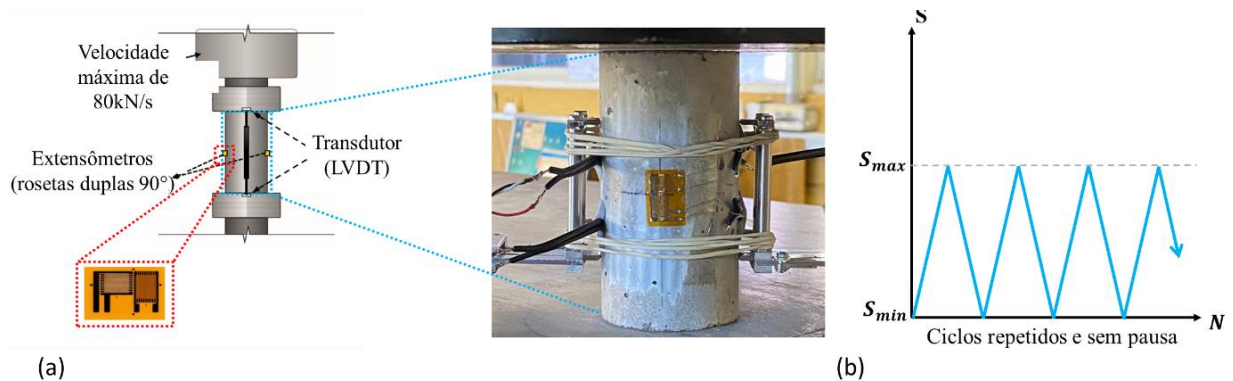


Figura 4. Esquema (a) de instrumentação e (b) do carregamento cíclico.

Os ensaios de fadiga foram configurados por meio do controle de carga. Como apresentado na Figura 4.b, a definição das cargas máximas e mínimas foi realizada considerando duas configurações distintas, uma para a carga máxima de 50% da resistência à compressão (f_c) e outra para 70% de f_c , considerando nos dois casos, uma carga mínima de 0 kN, o que configura relações entre tensões mínima e máxima (R) de 0,00 para os dois casos.

Foram analisados quatro corpos de prova para a determinação do número de ciclos médio, necessário para a ruptura por fadiga na compressão, para os dezoito casos estudados. Os dezoito casos se referem à combinação das três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz), dos dois níveis de tensão máxima (50% e 70% de f_c) e das três classes de resistência à compressão (30, 50 e 70 MPa).

Para facilitar a leitura dos resultados, utilizou-se a nomenclatura C#S#F#, onde C# remete à classe de resistência do concreto (C30 para 30 MPa, C50 para 50 MPa ou C70 para 70 MPa), S# refere-se à tensão máxima adotada (S5 para 50% e S7 para 70%) e F# descreve a frequência do carregamento (F125 para 0,125 Hz, F25 para 0,25 Hz e F5 para 0,5 Hz).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização

A caracterização das propriedades mecânicas dos concretos empregados no estudo experimental foi conduzida por meio de ensaios de resistência à compressão do concreto (f_c), módulo de elasticidade estático (E_c) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

No que se refere à determinação da resistência à compressão dos concretos, ensaios de compressão estática foram conduzidos em seis corpos de prova para cada um dos traços. Os ensaios foram conduzidos aos 7, 28 e 90 dias, onde os concretos permaneceram em cura com temperatura e umidade controladas em 25°C e 75%, respectivamente. Na Figura 5.a são apresentadas as médias das resistências à compressão dos concretos, considerando os três instantes de tempo avaliados. As áreas sombreadas no gráfico representam a faixa de valores referentes à média $\pm$ o desvio padrão amostral.

Na Figura 5.b são apresentadas as médias dos resultados obtidos para todas as propriedades mecânicas avaliadas aos 90 dias. Os dados foram dispostos de modo a indicar a resistência à compressão, o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico. Além disso, são apresentados os desvios padrão das propriedades avaliadas.

Os resultados de caracterização das propriedades mecânicas indicam que os concretos dosados apresentam resistência à compressão média, aos 28 dias, adequada à classe de resistência para o

qual foram dosados, sendo as resistências médias de 35,35 MPa para o traço C30, 53,21 MPa para o traço C50 e 73,74 MPa para o traço C70.

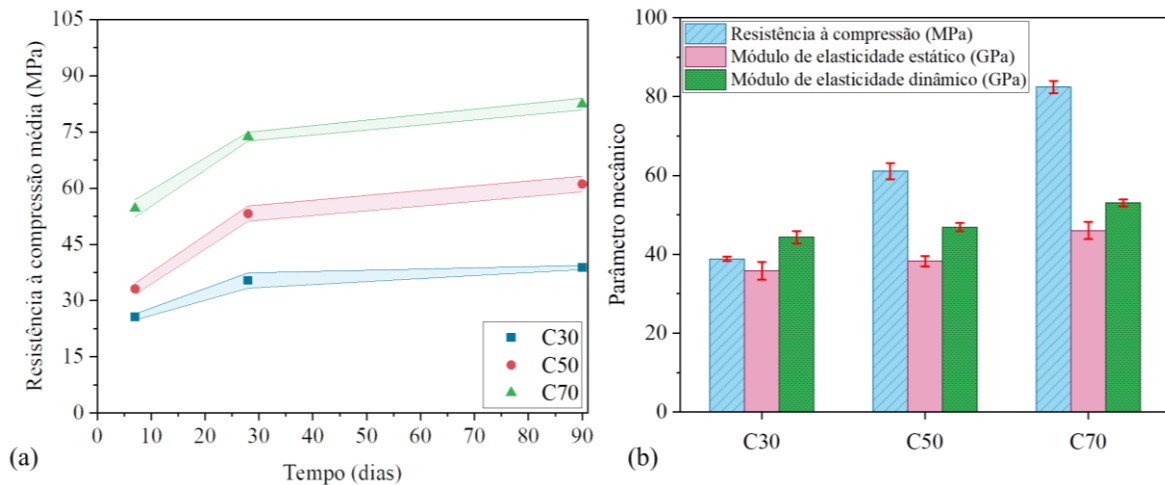


Figura 5. Médias e desvios da (a) resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias, e (b) da resistência à compressão, módulos de elasticidade estático e dinâmico aos 90 dias.

Quanto ao módulo de elasticidade estático, foi observado uma pequena variação do seu valor ao variar a resistência à compressão do material. Este resultado, corrobora com os estudos realizados por Vasconcellos (2018) e Graeff e Prudêncio Jr. (2016), onde foi verificado por meio de estudos experimentais que uma alteração significativa da resistência à compressão do concreto não configura, necessariamente, uma alteração significativa no valor do módulo de elasticidade, sendo importante avaliar outros parâmetros, à exemplo da relação água/cimento, teor de pasta cimentícia, e a proporção de agregados.

Com o objetivo de analisar os valores obtidos para os módulos estáticos e dinâmicos, a Equação (4) foi empregada para avaliar se o módulo de elasticidade estático, obtido experimentalmente, se aproximava do módulo de elasticidade estático estimado via módulo dinâmico. Dá aplicação da Equação (4), obteve-se para os concretos C30, C50 e C70, módulos estático iguais a 35,50, 39,27 e 45,65 GPa, respectivamente, enquanto os valores médios experimentais foram de 35,84, 38,29 e 46,05 GPa. A diferença percentual entre os valores obtidos na previsão e, os mensurados experimentalmente, foi de 0,94, 2,55 e 0,86%, para os concretos C30, C50 e C70, respectivamente. Este resultado denota o nível de acurácia da Equação (4) na previsão do módulo de elasticidade estático do concreto, considerando resultados obtidos via Técnica de Excitação por Impulso (TEI).

4.2 Vida útil à fadiga

Diante dos diferentes cenários de carregamento considerados na campanha experimental, e considerando as propriedades mecânicas aferidas e dispostas nas Figuras 5.a e 5.b, nas Figuras 6-8 são apresentados os números de ciclos (VUF) que cada uma das quatro amostras ensaiadas, por compressão cíclica, resistiu antes de ocorrer a ruptura. Os resultados foram dispostos de modo a apresentar o número de ciclos necessários para causar a falha de cada um dos quatro corpos de prova (VUF) e a média dos valores obtidos em cada lote de amostragem (linha vermelha). Nos gráficos também são representados boxes contendo o primeiro e terceiro percentis.

A fim de avaliar a viabilidade dos modelos clássicos de previsão da vida útil à fadiga do concreto, as Equações (2) e (3) foram empregadas de modo a estimar a VUF dos concretos analisados neste trabalho. Os resultados obtidos foram confrontados com os observados experimentalmente.

Da aplicação da Equação (2), a VUF predita foi de 38 milhões de ciclos para concretos submetidos à tensão máxima de 50% da f_c , e 200 mil ciclos para concretos submetidos à tensão máxima de

70% da f_c , sendo estes valores muito superiores aos resultados dispostos nas Figuras 6-8. Já ao utilizar a Equação (3), a VUF predita foi inferior ao valor obtidos pela Equação (2), sendo calculada uma VUF de 19 milhões de ciclos para concretos submetidos à tensão máxima de 50% da f_c , e 23 mil ciclos para concretos submetidos à tensão máxima de 70% da f_c , resultado também muito superior aos obtidos experimentalmente. Cabe destacar que os resultados obtidos pelas formulações, não dependem da classe de resistência do material, e tão pouco, das condições de carregamento.

Assim, os resultados obtidos pelas Equações (2) e (3) denotam a importância do estudo do comportamento e vida útil à fadiga de concretos sujeitos a cargas cíclicas, a fim de entender melhor o comportamento do material e propor modelos que incorporem em suas formulações parâmetros atrelados às condições de carregamento e da rigidez do material.

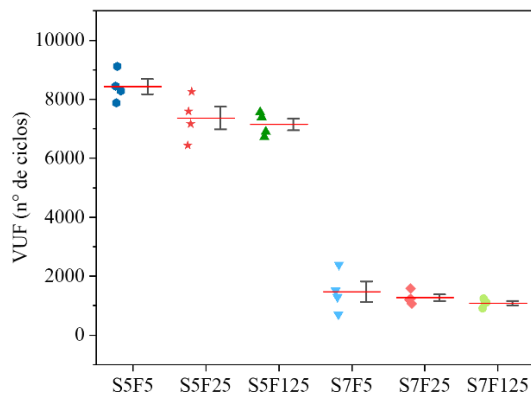


Figura 6. VUF dos concretos C30.

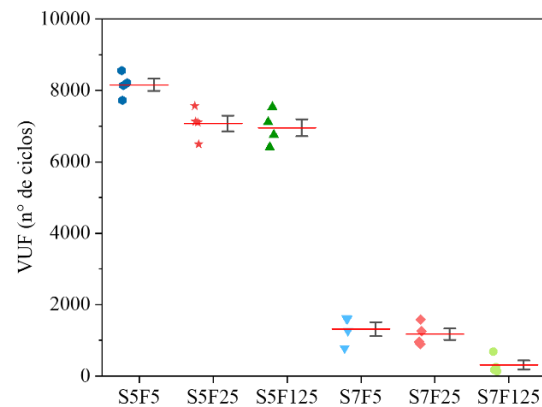


Figura 7. VUF dos concretos C50.

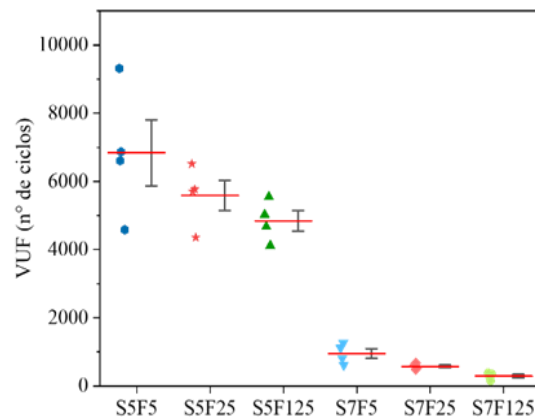


Figura 8. VUF dos concretos C70.

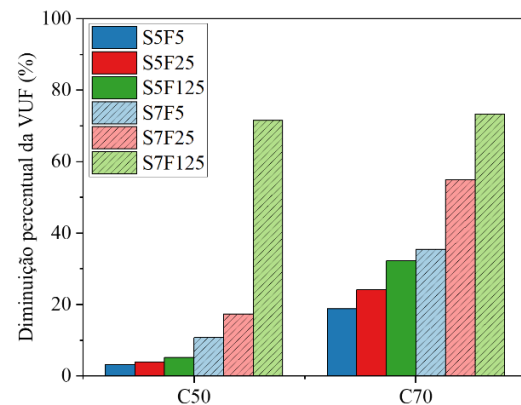


Figura 9. Variação da vida útil à fadiga dos concretos C50 e C70 em relação ao C30

Ao avaliar as Figura 6-8, é possível observar que mesmo para baixas frequências ($f < 1,0$), o número de ciclos necessário para levar as amostras à ruptura, decresce à medida em que diminui a frequência de carregamento, comportamento observado também nos trabalhos de Zhang et al. (1996) e Medeiros (2012). Ademais, observa-se que este comportamento se apresenta independentemente do nível de tensão máxima aplicada (50% ou 70% de f_c), diferente do observado por Jansen (1996), onde o autor relata uma pequena ou quase inexistente influência da frequência na vida útil à fadiga de concretos com tensões máximas inferiores à 75% da resistência à compressão.

Corroborando com os resultados encontrados neste trabalho, o estudo experimental conduzido por

Kim e Kim (1996), aponta que a vida útil à fadiga do concreto diminui na medida em que aumenta a tensão máxima aplicada e que essa característica possui maior evidência em concretos de alta resistência.

Com o propósito de avaliar a influência da resistência à compressão do concreto conjuntamente com a frequência do carregamento e o nível de tensão máxima na resistência à fadiga do material, na Figura 9 é apresentado um gráfico contendo a diminuição percentual da vida útil à fadiga (VUF) dos concretos de lote C50 e C70, em relação à VUF aferida nos concretos de lote C30.

Ao analisar os resultados dispostos nas Figuras 6-9, observa-se uma relação positiva entre a resistência à compressão do concreto e a vida útil à fadiga, sendo essa relação mais evidente quando da avaliação de concretos com resistência superior a 50 MPa (concretos de alta resistência). A influência da resistência à compressão na vida útil à fadiga foi investigada nos trabalhos de Al-Gadhib et al. (2000) e Kessler-Kramer et al. (2003), onde os autores indicam que a fragilidade que o material adquire ao ganhar resistência pode ser diretamente atrelada ao seu comportamento à fadiga, uma vez que a fadiga é definida pela degradação do material ao ser submetido a um carregamento cíclico.

Considerando os resultados dispostos na Figura 9 e sabendo que os concretos dos lotes C50 e C70 apresentam, respectivamente, resistências médias superiores a 57,37% e 112,33%, pôde-se inferir que a redução da VUF é maior para os concretos submetidos ao maior nível de tensão máxima aplicado (70% de f_c), independente da resistência do material. Ademais, observou-se que as reduções na VUF aumentam com a diminuição da frequência do carregamento adotado.

Dados os resultados apresentados nesta seção, infere-se um crescimento na vida útil à fadiga ao aumentar a frequência de carregamento, desde que mantido o mesmo nível de tensão aplicado no material. Ademais, observa-se que este comportamento é melhor visualizado quando da análise de concretos de alta resistência à compressão.

Uma possível justificativa encontrada por Chen et al. (2017) para explicar este fenômeno, refere-se ao fato de que na aplicação de carregamentos cíclicos, o concreto deixa de ter o seu comportamento definido por propriedades estáticas passando a ser mais bem representado por propriedades dinâmicas, que por sua vez são superiores às propriedades estáticas.

Por fim, comenta-se que durante os ensaios não foi observado um modo de ruptura característico para o concreto sob compressão cíclica. No entanto, assim como acontece nos ensaios de compressão estática, a ruptura do material se configurou de modo mais abrupta nos concretos de maior resistência à compressão. Ademais, pontua-se que a abrupta ruptura observada na falha dos concretos de alta resistência, foi maior nos ensaios cíclicos que nos ensaios de compressão estática, indicando que o nível de fragilidade do material é um parâmetro de influência no comportamento mecânico de concretos sujeitos a carregamentos cíclicos.

5. CONCLUSÕES

O comportamento mecânico do concreto submetido à compressão cíclica foi investigado experimentalmente neste trabalho por meio da avaliação da vida útil à fadiga, considerando concretos de três classes de resistência e sujeitos à diferentes condições de carregamento. Ao avaliar os resultados obtidos, pode-se indicar as seguintes considerações:

- A vida útil à fadiga é maior à medida que aumenta a frequência de carregamento aplicada, condição válida desde que mantido o nível de tensão máxima aplicado. Uma plausível justificativa levantada para este comportamento, se deve aos maiores valores das propriedades dinâmicas do material, comparados com os valores das propriedades físicas (Figura 6.b);
- O número de ciclos necessário para levar a amostra à ruptura é reduzido ao aumentar o nível de tensão máxima aplicado. Este comportamento foi verificado e associado ao

aumento do nível de danificação do material, mensurado experimentalmente ao avaliar a redução do módulo de elasticidade tangente obtido do histórico dos carregamentos;

- Existe uma relação inversa entre a resistência à compressão do concreto e a vida útil à fadiga, sendo essa relação mais evidente quando da avaliação de concretos com resistência superior a 50 MPa (concretos de alta resistência);
- Ao considerar a variabilidade do número de ciclos necessário para gerar a ruptura do material (Figuras 6-8), observou-se que a dispersão dos dados em torno da média, decresce na medida em que diminui a frequência de carregamento, sendo este comportamento não dependente do nível de tensão máxima empregado. Este resultado pode indicar que o grau de confiabilidade de modelos de vida útil de componentes estruturais de concreto sujeitos à fadiga, deve ser inferido em função da frequência de carregamento ao qual as estruturas estão submetidas.

Por fim, comenta-se que este é o primeiro estudo experimental desenvolvido pelo grupo de pesquisa, e que no futuro, novos experimentos serão realizados a fim de estender as análises para outros níveis de tensão, frequência de carregamento e resistência à compressão do material. Como futuro trabalhos, pretende-se também propor curvas S-N para concretos submetidos à compressão cíclica, bem como formulações que auxiliem na análise o projeto à fadiga de elementos de concreto.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (CNPq 141078/2018 e CNPq 310564/2018-2) e, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES código 001) pelo fomento fornecido à pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 23: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. 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.
- Al-Gadhib, A. H., Baluch, M., Shaalan, A., Khan, A. (2000), *Damage model for monotonic and fatigue response of high strength concrete*. International Journal of Damage Mechanics, v. 9, n. 1, p. 57-78. <https://doi.org/10.1177/105678950000900105>
- Arora, S., Singh, S. P. (2016), *Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates*. Construction and Building Materials, v. 102, n. 1, p. 782-791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.098>

- ASTM International (2015), *ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*.
- 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 (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Chen, X., BU, J., Fan, X., Lu, J., Xu, L. (2017), *Effect of loading frequency and stress level on low cycle fatigue behavior of plain concrete in direct tension*. Construction and Building Materials, v. 133, p. 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.085>
- Clemmer, H. F. (1922), *Fatigue of concrete*. Proceedings, American Society for Testing and Materials. v. 22, n. 2, p. 408-419.
- Cornellissen, H. A. W. (1984), *Fatigue failure of concrete in tension*. Heron, v. 29, n. 4, p. 2-67.
- Cornelissen, H. A. W., Leewis, M. (1986) “*Fatigue experiments for the design of plain concrete pavements*” in: Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, CROW-PIARC-CEMBUREAU, Report 1, Holanda.
- Dowling, N. E. (2012), “*Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*”. Practice Hall, 4th edition, United States.
- Graeff, E.; Prudêncio Jr., L. R. (2016). *Determinação do módulo de elasticidade dos concretos da central de Itajaí da Maxmohr*. [S.l.]: Relatório técnico.
- Jansen A. (1996), “*Research to fatigue behaviour of topping on prefabricated concrete girders*”. Thesis (Master). Delft University of Technology. Holanda.
- Jiang, C., Xianglin, G., Huang, Q., Zhang, W. (2017), *Deformation of concrete under high-cycle fatigue loads in uniaxial and eccentric compression*. Construction and Building Materials, v. 141, p. 379-392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.023>
- Junges, P. (2017), “*Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado a partir de dados de sistemas B-WIM*”. Tese (Doutorado). Centro Tecnológico: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Kasu, S. R., Deb, S., Mitra, N., Muppireddy, A. R., Kusam, S. R. (2019), *Influence of aggregate size on flexural fatigue response of concrete*. Construction and Building Materials, v. 229, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116922>
- Kessler-Kramer, C., Mechtcherine, V., Mueller, H. S. (2003), “*Failure of normal and high strength concrete under monotonic and cyclic tensile loading*” in: Brittle Matrix Composites 7. Woodhead Publishing. p. 277-286. <https://doi.org/10.1533/9780857093103.277>
- Kim, J. K., Kim, Y. Y. (1996), *Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete*. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 10, p. 1513-1523.
- Kim, J., Yi, C., Lee, S. J., Zi, G. (2013), *Flexural fatigue behaviour of concrete under uniaxial and biaxial stress*. Magazine of Concrete Research, v. 65, n. 12, p. 757-764. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00151-2)
- Lantsoght, E. O. L., Van Der Veen, C., Boer, A. (2016), *Proposal for the fatigue strength of concrete under cycles of compression*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 138-156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.007>
- Lee, M. K., Barr, B. I. G. (2004), *An overview of the fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites. v. 26, p. 299-305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)
- Lü, P., Li, Q., Song, Y. (2004), *Damage constitutive of concrete under uniaxial alternate tension-compression fatigue loading based on double bounding surfaces*. International Journal of Solids and Structures, v. 41, p. 3151-3166. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.01.026>
- Mascarenhas, F. Jr. R., Carvalho, R. C. (2019), *Vida útil à fadiga da armadura longitudinal de vigas de pontes de concreto armado frente ao tráfego real de veículos pesados*. Revista ALCONPAT, v. 9, n. 3, p. 303-319. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.375>

- Medeiros, A. (2012), “*Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras*”. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Ortega, J. J., Ruiz, G., Yu, R. C., Afanador-García, N., Tarifa, M., Poveda, E., Zhang, X., Evangelista JR., F. (2018), *Number of tests and corresponding error in concrete fatigue*. International journal of fatigue, v. 116, p. 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.022>
- Popovics, J. S. (2008) “*A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete*”. University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Reports.
- Raithby, K. D., Galloway, J. W. (1974), “*Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete*” in: ABELES Symposium: Fatigue of Concrete. ACI Publication, v. 41, p. 15-34.
- Rodrigues, P. P. F. (1984), “*Parâmetros de dosagem do concreto*.” São Paulo: ABCP, 1984.
- Saini, B. S., Singh, S. P. (2020), *Flexural fatigue life analysis of self-compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, v. 253, p. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119176>
- Sparks, P. R. (1982), *Influence of rate of loading and material variability on the fatigue characteristics of concrete*. ACI Journal, v. 75, n. 16, p. 331-342.
- Subramaniam, K. V., Shah, S. P. (2003), *Biaxial tension fatigue response of concrete*. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 6, p. 617-623. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00075-6)
- Tepfers, R., Kutti, T. (1979), *Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete*. ACI Journal, v. 76, n. 29, p. 635-652.
- Vasconcellos, A. T. D. (2018). “*Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos*”. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.
- Xiao, J., Li, H., Yang, Z. (2013), *Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings*. Construction and Building Materials, v. 38, p. 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.024>
- Zhang, B., Phillips, D. V., Wu, K. (1996), *Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 48, n. 177, p. 361-375. <https://doi.org/10.1680/mac.1996.48.177.361>
- Zhang, B., Phillips, D. V., Wu, K. (1997), *Further research on fatigue properties of plain concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 49, n. 78, p. 241-252. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.180.241>

Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos

J. Payá^{1*} , J. Monzó¹ , M. V. Borrachero¹ , L. Soriano¹ , M. M. Tashima² 

* Autor de Contato: jjpaya@cst.upv.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>

Recepção: 08/11/2021 | Aceitação: 07/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Os Cimentos Ativados por Alcalinos (CAA) requerem um componente alcalino para a ativação do precursor. A fabricação do ativador alcalino (AA) envolve um consumo de energia e matéria-prima muito importante, de forma que a pegada de carbono dos CAA é fundamentalmente influenciada por este fator. Uma alternativa é o uso de outros materiais para a preparação de AA. Neste trabalho é realizada uma análise exaustiva das diferentes alternativas: materiais à base de sílica para a preparação de silicatos alternativos e materiais à base de alcalinos. As pegadas de carbono são comparadas com os cimentos Portland comerciais, comparando o efeito da substituição dos reagentes comerciais por ativadores alternativos.

Palavras-chave: ativação alcalina; ativadores alternativos; cinza de biomassa; resíduos industriais; pegada de carbono.

Citar como: Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M. (2022), “Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 16 – 31, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>

¹ Grupo de Investigación en Química de los Materiales (GIQUIMA), Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

² Grupo de Pesquisa MAC– Materiais Alternativos de Construção, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a atividade de pesquisa bibliográfica foi realizada por M. Tashima (50%) e L. Soriano (50%); a atividade de extração de informação por J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) e M. Tashima (20%); a redação do documento por J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) e M. Tashima (20%); a revisão do texto de J. Payá (20%), J. Monzó (20%), M.V. Borrachero (20%), L. Soriano (20%) e M. Tashima (20%); o desenho das figuras e a adaptação ao formato de J. Payá (100%); Tradução para o inglês M. Tashima (100%).

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Alternative activators in alkali activated cements

ABSTRACT

Alkali activated cements (AAC) require an alkaline component for activating of the precursor. The manufacture of the alkaline activator (AA) involves a very important energy and raw material consumption, so that the carbon footprint (CF) of AAC is basically influenced by this factor. An alternative is the use of other materials for AA preparation. In this work an exhaustive analysis of the different alternatives is carried out: silica-based materials to prepare of alternative silicates and alkaline-based materials. CF is compared relative to commercial Portland cements, and the effect of replacing commercial reagents with alternative activators is analyzed.

Keywords: alkali activation; alternative activators; biomass ash; industrial waste; carbon footprint.

Activadores alternativos para cementos de activación alcalina

RESUMEN

Los cementos de activación alcalina (CAA) requieren de un componente alcalino para la activación del precursor. La fabricación del activador alcalino (AA) supone un consumo energético y de materias primas muy importante, de modo que la huella de carbono de los CAA está fundamentalmente influenciada por ese factor. Una alternativa es el uso de otras materias para la preparación del AA. En este trabajo se realiza un exhaustivo análisis de las diferentes alternativas: materias de base silíceas para la preparación de silicatos alternativos y materias de base alcalina. Se comparan de forma relativa las huellas de carbono con respecto a cementos Portland comerciales, y se analiza el efecto que tiene la sustitución de reactivos comerciales por activadores alternativos.

Palabras clave: activación alcalina; activadores alternativos; cenizas de biomasa; residuos industriales; huella de carbono.

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.

Lista de acrônimos (em ordem de aparecimento no texto)

Acrônimo	Significado
AA	Ativador alcalino
CAA	Cimento de ativação alcalina
MK	Metacaulim
CV	Cinza volante de carvão
ESC	Escória de alto forno
CER	Resíduo cerâmico
NS	Nanossílica
TD	Terra de diatomáceas
FCC	Catalisador de cracking catalítico
SS	Silicato de sódio
TDR	Terra diatomácea residual
HS	Sílica ativa
RV	Resíduo de vidro
CCA	Cinza de casca de arroz
CPCA	Cinza de palha de cana de açúcar
CBCA	Cinza de bagaço de cana
CFB	Cinza da folha de bambu
LB	Licor Bayer
LV	Lama vermelha
FLA	Fluido de limpeza alcalino
CHO	Cinza de biomassa de caroço de oliva
CCAL	Cinza de casca de amêndoa
CMAC	Cinza de madeira com alto teor de cálcio
CEM	Cinza de espiga de milho

1. INTRODUÇÃO

O termo “Economia Circular” tem sido incluído na maioria das propostas sobre o desenvolvimento da humanidade nos desafios globais (mudanças climáticas, biodiversidade, resíduos e poluição). Esta economia circular está centrada num modelo de produção+consumo em que se priorizam a redução, reutilização, reparação, reciclagem, recuperação e valorização dos produtos. Desta forma, o ciclo de vida dos produtos deve ser estendido ao máximo, minimizando tanto o consumo de recursos naturais e de energia quanto a geração de resíduos e poluição do meio ambiente.

A circularidade pode e deve ser estendida a cada uma das áreas do desenvolvimento, científica, tecnológica e humana. Dado que muitos dos processos de fabricação estão relacionados a processos e reações químicas, da mesma forma que os fenômenos de poluição e gerenciamento de resíduos, o termo “Química Circular” (Keijer et al., 2019; Mohan e Katakojwala, 2021) assume especial importância. A Química é a ciência essencial para a Economia Circular, onde a estratégia se concentra na inovação química nos níveis atômico, molecular e estrutural.

No campo da construção e, especificamente, na área do concreto, material mais utilizado pela humanidade depois da água, deve ser desenvolvido sob a égide da Química Circular. O cimento, como material aglomerante fundamental na preparação do concreto, é um material sintético fabricado a partir de diversos componentes e é constituído por um conjunto de compostos químicos que, por reação com a água, desenvolvem outros produtos químicos responsáveis pelas propriedades tecnológicas dos aglomerantes.

Na antiguidade, os aglomerantes aéreos à base de gesso e cal hidratada já eram preparados a partir da transformação de materiais naturais, e esses aglomerantes reagiam com a água e/ou dióxido de carbono para produzir materiais resistentes e com estabilidade para determinados ambientes. A introdução pelos engenheiros romanos de materiais pozolânicos, principalmente cinzas de origem vulcânica, nas misturas com cal hidratada, deu um giro químico transcendental (Pavía e Caro, 2008), que, muitos séculos depois, seria retomado para o desenvolvimento de novos cimentos com adições pozolânicas.

No final do século XVIII e início do século XIX, processos químicos foram implantados para a fabricação de aglomerantes hidráulicos, culminando com a patente de Joseph Aspdin em 1824: portanto, iniciou-se o período do cimento Portland, deslocando o uso de materiais como a cal e o gesso. O cimento é o material que constitui grande parte dos edifícios e infraestruturas daquele momento até os nossos dias (Hall, 1976). O desenvolvimento de processos químicos de alta temperatura (clinkerização) permitiu a elaboração de cimentos com alto desempenho e durabilidade invejável. O conhecimento das reações químicas de hidratação do cimento Portland e sua interação com os demais componentes do concreto e o ambiente (umidade, gás carbônico, cloretos, ...) tem permitido a evolução das características dos novos cimentos comerciais à base de o clínquer de cimento Portland.

Nas últimas décadas, a preocupação com a emissão de gases de efeito estufa que supõe a fabricação do cimento Portland, o esforço para reduzir o consumo de matérias-primas não renováveis e os requisitos para melhorar o desempenho tecnológico dos concretos, tem liderado a química dos materiais para caminhos novos, mais sustentáveis, complementares e mais circulares (Phair, 2006). Pesquisas aprofundadas têm sido realizadas em cimentos com maior proporção de adições pozolânicas e hidráulicas, cimentos belíticos, cimentos de sulfoaluminato de cálcio, cimentos de magnésia e cimentos de ativação alcalina.

O presente trabalho foca nos cimentos de ativação alcalina (CAA), especificamente os ativadores alcalinos (AA) utilizados, seu impacto em termos de pegada de carbono e as alternativas que uma aplicação da Química Circular supõe. O trabalho é dividido em uma seção inicial sobre os conceitos básicos da química de cimentos alcalinos ativados, seguido por uma avaliação comparativa da pegada de carbono associada a diferentes cimentos alcalinos ativados convencionais, em relação

aos cimentos Portland à base de clínquer, terminando com uma descrição dos materiais alternativos, de origem residual, que podem ser usados para a elaboração dos ativadores alcalinos e a avaliação da pegada, potencial, de carbono.

2. NATUREZA DOS CIMENTOS ATIVADOS por ALCALINOS (CAA) E ORIGEM DOS COMPONENTES

Basicamente, os cimentos ativados por alcalinos (CAA) são formados pela combinação de dois componentes ("duas partes"): a maioria é o precursor, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ de base química (exemplos: metacaulim MK, cinzas volantes de uma usina termoeletrica a carvão CV), embora em alguns casos também possa conter quantidades significativas de CaO (escória de alto-forno, ESC). O outro componente, minoritário é uma solução aquosa altamente alcalina (hidróxidos, silicatos, carbonatos de sódio ou potássio). A mistura desses dois componentes produz a formação de substâncias cimentícias do tipo silicoaluminato alcalino (Na,K) hidratado (N(K)-A-S-H) ou, no caso de cálcio, silicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H); também é possível produzir géis de natureza híbrida entre os dois anteriores, C(N,K)-A-S-H.

A grande vantagem desses CAA, do ponto de vista da química circular e do ponto de vista da sustentabilidade, é que, em muitos casos, podem ser aproveitados resíduos de outras atividades antrópicas industriais e agrícolas. É o caso do ESC e do CV, bem como dos resíduos de construção como o tipo cerâmico, CER. Em outros casos, a circularidade não é possível, pois o precursor é feito propositalmente, como o MK (calcinação do caulim a 800°C). Em CAA evita-se a aplicação de temperaturas muito elevadas, como ocorre na clínquerização do cimento Portland (1450°C). A grande desvantagem dos CAA é que o ativador é uma substância quimicamente sintetizada: hidróxidos como NaOH e KOH , carbonatos de Na_2CO_3 e K_2CO_3 , silicatos Na_2SiO_3 (silicato de sódio e de potássio) e K_2SiO_3 . A obtenção dessas substâncias envolve a utilização de recursos naturais, a necessidade de processos químicos e, sobretudo, um grande consumo de energia, o que acarreta um impacto significativo e um afastamento da circularidade. Nos últimos anos houve um importante desenvolvimento do CAA no qual os dois componentes são combinados em um (tecnologia "uma parte"), de forma que sua aplicação segue o mesmo modelo dos cimentos tradicionais: adicionar água ao cimento "uma parte".

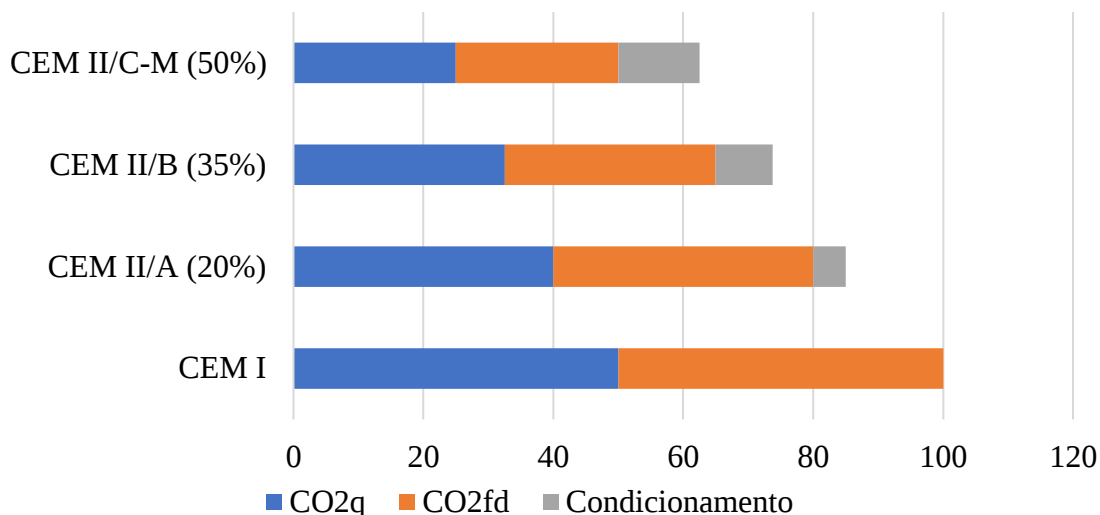
3. PEGADA DE CARBONO DE CIMENTOS ATIVADOS por ALCALINOS

É de conhecimento que a emissão de dióxido de carbono (CO_2) relacionada à fabricação do clínquer de cimento Portland, ou seja, a pegada de carbono, é muito elevada: o processo envolve uma emissão de 850 a 1200 kg $\text{CO}_2/\text{t-clínquer}$, tudo isso dependendo, fundamentalmente, das tecnologias utilizadas e da eficácia na recuperação do calor e no isolamento dos elementos industriais. A emissão de CO_2 é considerada como tendo dois componentes: de um lado, o componente químico e, de outro, o componente de energia.

O componente químico se deve à descarbonização do calcário. Para um clínquer contendo 64% de CaO , a quantidade de CO_2 no componente químico (CO_{2q}) é de aproximadamente 500 kg $\text{CO}_2/\text{t-clínquer}$. A quantidade de CO_2 no componente de energia (CO_{2fd}), associada ao consumo de combustível e energia elétrica, é aproximadamente igual ao de CO_{2q} (Luukkonen et al., 2016). A nível comparativo, podemos estabelecer um valor de 100 para a emissão de CO_2 associada a um cimento com 95% de clínquer (cimento do tipo CEM I na nomenclatura europeia), com uma contribuição de 50 para CO_{2q} e 50 para CO_{2fd} (Ver Figura 1, EMC I). No caso dos cimentos com adições minerais, cada uma das contribuições é reduzida proporcionalmente: A Fig. 1 mostra os casos do CEM II/A (com 20% de adição) e CEM II/B (com 35% de adição). Atualmente, a nível

européu, estão a trabalhar na normalização do cimento CEM II/C-M (EN 197-5, 2021), em que existe uma mistura de adições (M) até 50%, exemplo também apresentado na Fig. 1. No caso de cimentos com adições, devemos considerar que pode haver consumo de energia na sua preparação (peneiramento, moagem, secagem), seja em processos independentes ou em processos de mistura conjunta com clínquer sem moagem. É por isso que, nesses casos, existe um componente adicional que chamamos de condicionamento.

Os ativadores alcalinos sintéticos estão associados a certos valores de emissão de CO₂ equivalente (CO₂-e, kgCO₂/kg-reagente); esses valores dependem muito do processo industrial e da tecnologia utilizada na síntese (ver Tabela 1).



Chave: CO₂q: componente químico; CO₂fd: componente de energia; Condicionamento: tratamento de adições, prévio ou simultâneo com clínquer).

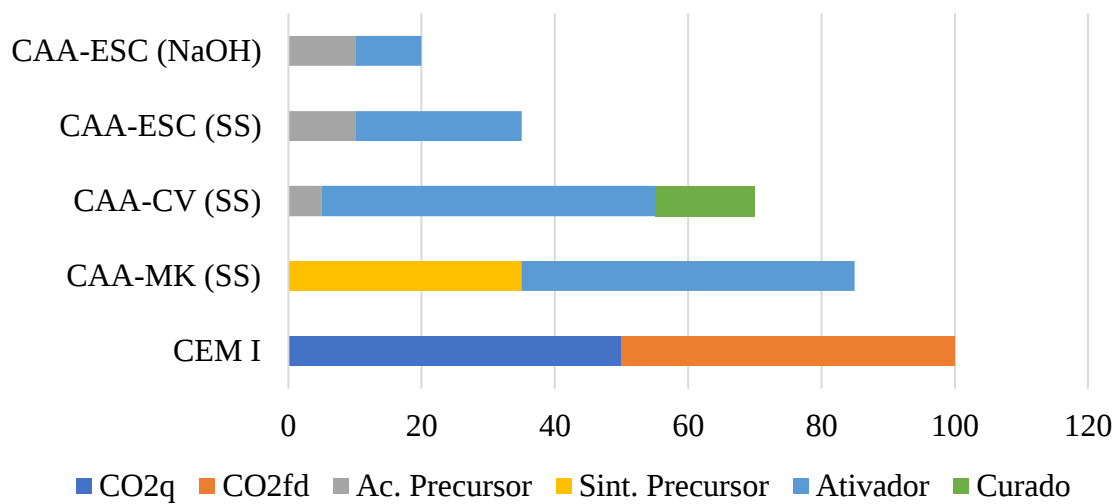
Figura 1. Comparação das emissões relativas de cimentos à base de clínquer de cimento Portland: CEM I, CEM II/A (com 20% de adição), CEM II/B (com 35% de adição) e CEM II/C-M (com 50% de adição). Escala relativa levando 100 para CEM I.

Tabela 1. Emissões de CO₂ associadas de alguns reagentes alcalinos (retirado de: www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-)

Reagente	CO ₂ -e kgCO ₂ /kg-reagente
NaOH	1.12
KOH	1.94
Na ₂ CO ₃	0.59
K ₂ CO ₃	2.38
Na ₂ SiO ₃	1.64

Os CAA baseados em metacaulim (MK) requerem quantidades significativas de ativador, especialmente silicato de sódio SS (Weil et al., 2009). Da mesma forma, a fabricação do MK requer a calcinação do caulim a 800°C, razão pela qual a síntese do precursor acarreta um significativo consumo de energia. Um cálculo aproximado das emissões associadas para um CAA baseado no MK é mostrado na Fig. 2: pode-se verificar que, comparando com o CEM I, não há diferença significativamente vantajosa. Logicamente, quanto menor for o consumo de silicato de sódio na dosagem, tanto mais vantajoso. Os CAA baseados em cinzas volantes (CV) também requerem grandes quantidades de ativador, e para alcançar um bom desenvolvimento da geopolimerização é

necessária uma cura em alta temperatura, portanto, há um consumo de energia adicional a levar em conta em sua aplicação (curado). A Fig. 2 mostra que a emissão de CO₂ associada também é muito alta. Nos dois casos anteriores, com base no MK e no CV, o teor de cálcio dos referidos precursores é baixo, o que requer grandes quantidades de ativador. No caso de precursores ricos em cálcio, como a escória de alto forno ESC, quantidades menores de ativador são necessárias. Além disso, o precursor pode ser ativado apenas com NaOH, sem a necessidade do uso de silicato alcalino (SS ou silicato de potássio). A Fig. 2 mostra a grande vantagem existente para o CAA-ESC no que diz respeito à pegada de carbono relativa quando comparado com os CAA anteriores discutidos. A escória requer moagem prévia (condicionamento do precursor) para facilitar a reatividade no meio alcalino.



Chave: CO₂q: componente químico; CO₂fd: componente de energia; Ac. precursor: condicionamento (trituração); Sint. Precursor: processo de síntese do precursor (calcinação); Ativador: associado à fabricação do ativador; Cura: associada ao consumo de energia para a cura).

Figura 2. Comparação das emissões relativas de cimentos CEM I com CAA baseados em metacaulim (MK), cinza volante (CV) e escória de alto forno (ESC). Ativadores: hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (SS). Escala relativa levando 100 para CEM I.

4. ATIVADORES ALTERNATIVOS ALCALINOS

Como foi visto na seção anterior, a contribuição do ativador para a pegada de carbono do CAA é muito relevante, portanto, as melhorias a esse respeito devem se concentrar em minimizar esse componente. Uma opção seria se concentrar em melhorar os processos químicos para a síntese de reagentes químicos, de modo que o CO₂-e associado seja reduzido. A outra opção, mais adequada para economia circular e química, é a recuperação de resíduos agrícolas e industriais. Nos últimos anos, tem havido uma escalada na publicação de artigos científicos em que os resíduos são valorizados, com o objetivo de alcançar ativadores eficientes e com menor pegada de carbono. Nessas publicações você pode encontrar propostas variadas, que seriam classificadas nos seguintes conjuntos:

- a) Ativadores alternativos à base de sílica: são ativadores relacionados aos silicatos alcalinos, onde um hidróxido alcalino reage com uma matéria-prima rica em sílica, que se dissolve total ou parcialmente.

- b) Ativadores alternativos à base de álcalis: neste caso, o próprio material já é uma substância alcalina, à base de sódio ou potássio.
- c) Sistemas ativadores combinados de sílica-álcali.

4.1. Ativadores alternativos à base de sílica

Neste conjunto existem diferentes estratégias; por um lado, a utilização de recursos naturais à base de sílica que podem ser dissolvidos em diferentes condições; por outro lado, a disponibilidade de cinzas da combustão da biomassa, cinzas com altos percentuais de SiO_2 ; e, por fim, existe a opção de utilização de algum resíduo industrial rico em sílica potencialmente reativa.

4.1.1. Ativadores à base de sílica procedente de recursos naturais.

Nesta seção, encontramos referências a dois recursos naturais: terra de diatomáceas e olivina.

A terra de diatomáceas (TD) é um material rico em sílica (geralmente $\text{SiO}_2 > 80\%$) formado pelos esqueletos de diatomáceas, algas unicelulares que foram depositadas ao longo de milhões de anos. Esta rocha de origem sedimentar apresenta sílica no estado amorfo, que pode ser dissolvida em soluções alcalinas. Font et al. (2018) apresentaram um estudo no qual o TD foi reagido com NaOH em um recipiente isolado termicamente: a dissolução de pallets de NaOH em água aumenta a temperatura do meio aquoso e isso favorece a dissolução da sílica amorfa. Os resultados obtidos mostram um bom comportamento do ativador preparado. Assim, esses autores utilizaram este ativador para o precursor FCC (catalisador de craqueamento catalítico utilizado), obtendo, nas argamassas, resistências mecânicas de 30 MPa após 7 dias de cura à temperatura ambiente, sem a necessidade de cura em alta temperatura.

A olivina, $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$, é um material natural que pode ser utilizado para a obtenção da nanossílica, a partir de um processo de dissolução com ácido sulfúrico concentrado e posterior filtração (Gao et al., 2017). Esses autores usaram uma solução preparada com nanossílica (NS) e NaOH, e mostraram que a reatividade era semelhante à do silicato de sódio comercial (vidro, SS). Eles aplicaram este ativador a uma mistura de escória de alto forno (ESC) e cinza volante (CV), na proporção 70/30, e a resistência mecânica dos concretos obtidos foi encontrada no intervalo 57 a 68 MPa aos 7 dias e 72 a 82 MPa aos 28 dias, dependendo do módulo de sílica (razão molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) utilizado na ativação.

4.1.2. Ativadores à base de sílica procedente de resíduos industriais.

Esta seção descreve exemplos baseados em resíduos de terra diatomácea, sílica ativa e resíduos de vidro.

A terra diatomácea é frequentemente usada como componente de materiais de filtro para líquidos, especialmente cerveja e vinho. No final do processo de filtração, é gerada uma terra diatomácea residual (TDR) que ainda contém quantidades significativas de sílica amorfa potencialmente solúvel. A TDR de filtro de cerveja (TDR-C) foi usado para preparar ativadores com NaOH (Mejía et al., 2016); este ativador foi combinado com um precursor formado por uma mistura de CV e MK (70/30) e a pasta foi curada a 60°C por 24 h e posteriormente curada em temperatura ambiente por até 360 dias. Os valores de resistência à compressão no intervalo de 7 a 360 dias foram próximos a 35 MPa. O TDR do filtro do vinho (TDR-V) foi estudado por Font et al. (2018); esses autores avaliaram o comportamento do ativador a partir desse resíduo e observaram que havia uma melhora substancial se o TDR-V fosse calcinado a 650°C para eliminar a matéria orgânica da filtração: a resistência mecânica à compressão, aos 28 dias, do ativado, as argamassas FCC eram cerca de 20 MPa, para o sistema sem calcinação prévia de TDR-V, enquanto atingia 40 MPa para o sistema com calcinação.

A sílica ativa (HS) é bem conhecida por ser uma excelente pozolana em sistemas de cimento Portland, devido à alta finura e caráter amorfo dessa adição de mineral à base de sílica. Esse

resíduo, proveniente da indústria de silício e ligas de ferrosilício, pode ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de ativadores. Assim, Rouseková et al. (1997) estudaram a ativação do ESC com uma mistura de HS e NaOH, obtendo bons resultados. Posteriormente, Bernal et al. (2012) estudaram o ativador HS/NaOH em sistemas MK+ESC; mostraram que a sílica de HS foi incorporada em tempos muito curtos na reação de geopolimerização, e foram formadas misturas de géis cimentícios C-A-S-H, N-A-S-H, ou mesmo gel N-(C)-A-S-H.

Em relação aos resíduos de vidro (RV), podem ser encontradas várias composições químicas, embora a mais notável seja o estado amorfo e um alto percentual de sílica. Desde 2014, o potencial da RV para fabricar ativadores vem sendo estudado. As porcentagens de SiO_2 no RV estão principalmente na faixa de 65-80%, e teores significativos de CaO e Na_2O (Liu et al., 2019). Várias abordagens têm sido feitas para a preparação do ativador alcalino, conforme mostrado na Fig. 3: método de fusão, métodos hidrotérmicos e método termoquímico. Foi demonstrado que a natureza e a velocidade de formação dos hidratos cimentícios dependem, fundamentalmente, do tipo de precursor.

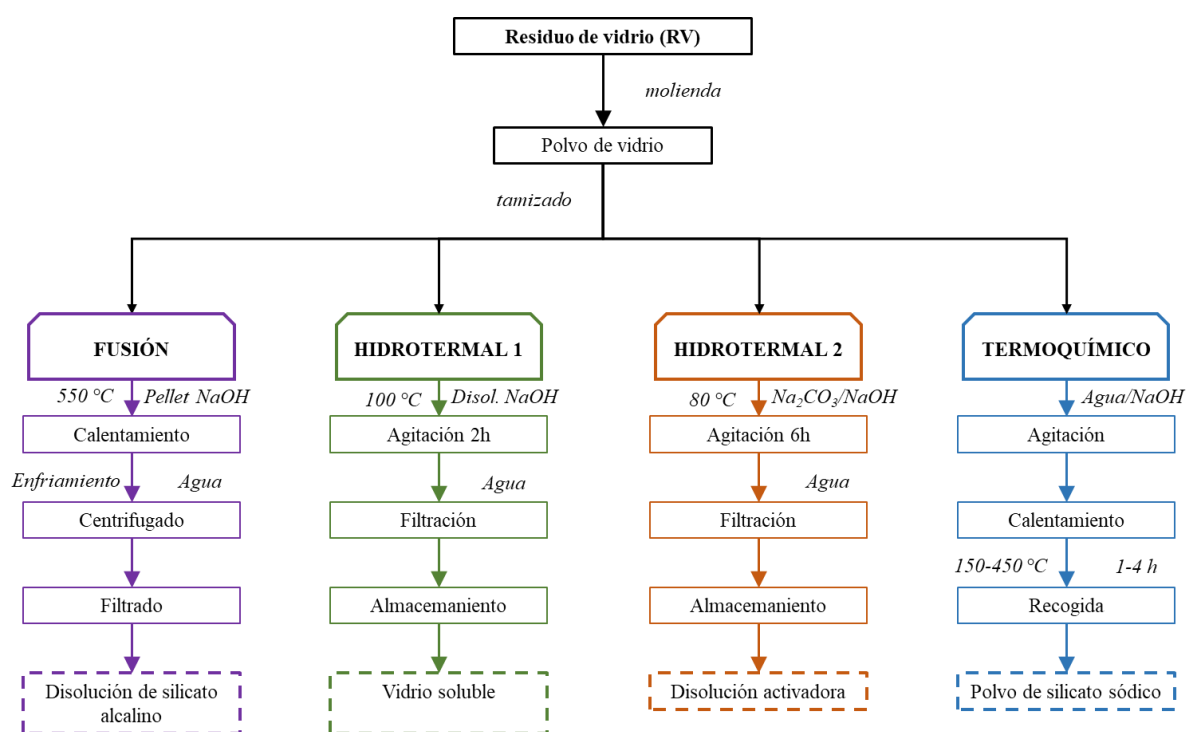


Figura 3. Métodos para obtenção de ativadores alternativos de resíduo de vidro (RV). (Adaptado de Lie et al, 2019).

4.1.3. Ativadores à base de sílica procedentes de cinzas de biomassa.

Nesta seção, encontra-se o maior número de exemplos de ativadores alternativos. A combustão da biomassa, em alguns casos, gera a formação de uma quantidade relativamente grande (1-4% em massa) de cinzas. Os exemplos mais significativos são os da casca de arroz, resíduos do cultivo e processamento da cana-de-açúcar e folha de bambu.

O caso da cinza obtida da casca de arroz (CCA) é o mais estudado. Um número significativo de exemplos foi publicado com o uso de CCA para a fabricação de silicato de sódio. A primeira referência bibliográfica data de 2010 (Bejarano et al., 2010); os autores propõem um processo hidrotérmico no qual analisam diferentes variáveis: a relação NaOH/CCA, o tempo de tratamento, a temperatura de reação e a relação água/CCA. A conclusão sobre os parâmetros ideais foram NaOH/CCA=2, água/CCA=10, 100°C de tratamento por 120 minutos. Com essas proporções, este grupo de pesquisa utilizou esse tipo de ativador na ativação alcalina de vários precursores comuns

(Mejía et al., 2016). Bouzón et al (2014) aplicaram um ativador obtido por refluxo de uma mistura de solução de NaOH com CCA parcialmente amorfo, utilizando o FCC como precursor no preparo da argamassa. Foram obtidos sistemas com excelente desempenho mecânico, embora tenha sido observado que o ativador era mais reativo se o CCA moído fosse utilizado no processo hidrotérmico (cerca de 60 minutos, contra 120 minutos para a amostra não moída). Outros autores investigaram métodos e aplicações (entre outros: Tong et al., 2018; Rajan e Kathirvel, 2021). Villca et al. (2021) utilizaram um ativador alternativo baseado em CCA, fabricado sem consumo de energia; o calor de dissolução das pelotas de NaOH foi simplesmente usado para dissolver a sílica amorfa do CCA. Este ativador foi aplicado, pela primeira vez, em sistemas binários de cal/pozolana e geopolímero. O cultivo da cana-de-açúcar produz um resíduo, a palha da cana, que costuma ser abandonada no campo. O uso dessa biomassa pode trazer benefícios em termos de recuperação de energia. O resíduo gerado, a cinza da palha da cana-de-açúcar (CPCA), contém grandes quantidades de sílica (Moraes et al., 2018). Nesta pesquisa, foi demonstrado que o procedimento que aproveita o calor de dissolução do NaOH para dissolver a sílica é perfeitamente viável para o CPCA, e que o tratamento não deve ultrapassar 24 horas, pois ocorre uma gelificação do ativador. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) também foi utilizada (Tchakouté et al., 2017) na geopolimerização do MK; o aglomerante preparado atingiu 33 MPa aos 28 dias de cura. Por fim, a cinza da folha de bambu (CFB), que apresenta uma porcentagem de SiO_2 próxima a 80% (Roselló et al., 2015), é outra opção interessante. O CFB foi utilizado por meio de um processo termoquímico com temperatura de 300-330°C (Vinai et al., 2021). O ativador foi utilizado para o sistema CV/ESC (60/40) e verificou-se que, embora, em comparação com o ativador SS+NaOH, a reatividade seja menor nos primeiros 7 dias de cura, aos 28 dias são atingidos as mesmas resistências (cerca de 43 MPa).

4.2. Ativadores alternativos baseados em álcalis.

A atividade humana também produz resíduos alcalinos, tanto de origem industrial como agrícola.

4.2.1. Ativadores de base alcalina procedentes da atividade industrial.

Entre eles podemos encontrar alguns resíduos relacionados à atividade metalúrgica, como licor Bayer, líquidos de limpeza de metais e lama vermelha.

O licor Bayer (LB) é uma solução cáustica preparada com NaOH e utilizada para a extração do alumínio da bauxita. A solução resultante, após filtrada, é reutilizável, mas deve ser descartada quando sua eficiência diminuir. Este resíduo, rico em aluminato de sódio, tem sido utilizado para a ativação do CV em diferentes condições (Jamieson et al. 2016).

A lama vermelha (LV) é o resíduo sólido gerado na extração do alumínio da bauxita, muito rico em óxidos de ferro e sílica. Esta lama tem um pH entre 9,7 e 12,8 e tem sido utilizada para ativar o CV (Choo et al., 2016), embora a resistência alcançada não exceda 2 MPa.

O último exemplo nesta categoria são os fluidos de limpeza alcalinos (FLA), que geralmente são produzidos como resíduos na limpeza de superfícies de alumínio, por isso são ricos em hidróxido de sódio e aluminato. Fernández-Jiménez et al. (2017) usaram FLA, com uma concentração de NaOH de aproximadamente 5M, para ativar o pó de CV e RV moídos. Em ambos os casos foi possível obter resistências mecânicas significativas, que giraram em torno de 10-16 MPa para CV e 2-10 MPa para RV (cura por 20 horas e 85°C).

4.2.2. Ativadores alcalinos procedentes de resíduos agrícolas.

Alguns resíduos agrícolas são biomassa que pode ser recuperada para a produção de energia e as cinzas resultantes são de natureza alcalina. Este caráter alcalino é determinado pela presença de cálcio e, principalmente, de potássio. É o caso da cinza de caroço de oliveira (CHO), cinza de casca de amêndoa (CCAL) e cinza de espiga de milho (CEM), bem como da cinza de madeira com alto

teor de cálcio (CMAC). A grande vantagem do uso dessas cinzas é que elas permitem a preparação de cimentos "uma parte", por se tratarem de materiais sólidos.

O primeiro estudo sobre o uso de CHO em CAA foi apresentado por Font et al. (2017); a ESC foi ativada com CHO e comparada à ativação pelo reagente químico KOH. O resultado mostrou que a resistência mecânica à compressão para o sistema ESC/CHO foi maior (29,9 MPa versus 16,9 MPa). Estudos posteriores (De Moraes Pinheiro et al., 2018) mostraram a formação de géis cimentícios do tipo C(K)-S-H, C(K)-S-A-H, além de pequenas quantidades de hidrocalcita. Posteriormente, Alonso et al. (2019) estudaram cinzas da biomassa da oliveira, tanto cinzas volantes quanto cinzas grelhadas: eles observaram que a alcalinidade dessas cinzas não era suficiente para ativar o CV, mas era suficiente para ativar o ESC. Payá et al. (2019) usou o sistema ESC/CHO para fabricar blocos de terra compactados com base dolomítica. Uma resistência à compressão dos blocos compactados de cerca de 12 MPa foi obtida após 9 dias com uma cura sob filme plástico (para evitar a evaporação da água e manter as condições ideais de hidratação). Os blocos resultantes apresentaram excelente resistência sob a água.

Soriano et al. (2020) foram os primeiros a estudar a potencialidade da cinza da casca da amêndoa (CCAL). Eles descobriram que a porcentagem em K_2O para CCAL foi maior do que para CHO (46,98% vs. 32,16%), e detectaram a presença de vários minerais de carbonato de cálcio e potássio ($K_2Ca(CO_3)_2$), como fairchildite e bütschilite, além de calcita ($CaCO_3$), portlandita ($Ca(OH)_2$) e arcanita (K_2SO_4). Esta cinza ofereceu bom desempenho quando combinada com ESC.

Vários autores investigaram o uso de cinzas de madeira com alto teor de cálcio (CMAC); dentre eles, o realizado por Ban et al. (2014), em que caracteriza a cinza e a utiliza como um sólido ativador de CV. As cinzas continham uma alta proporção de CaO (61%) em comparação com uma quantidade menor de K_2O (12%); os sais de cálcio encontrados foram calcita, portlandita e hidroxiapatita.

Cinza de espiga de milho (rachis ou coroa) (CEM) também tem sido usada para a ativação de MK (Peys et al., 2016): 30 MPa de resistência à compressão foi alcançado para amostras com uma relação CEM/MK de 1,2.

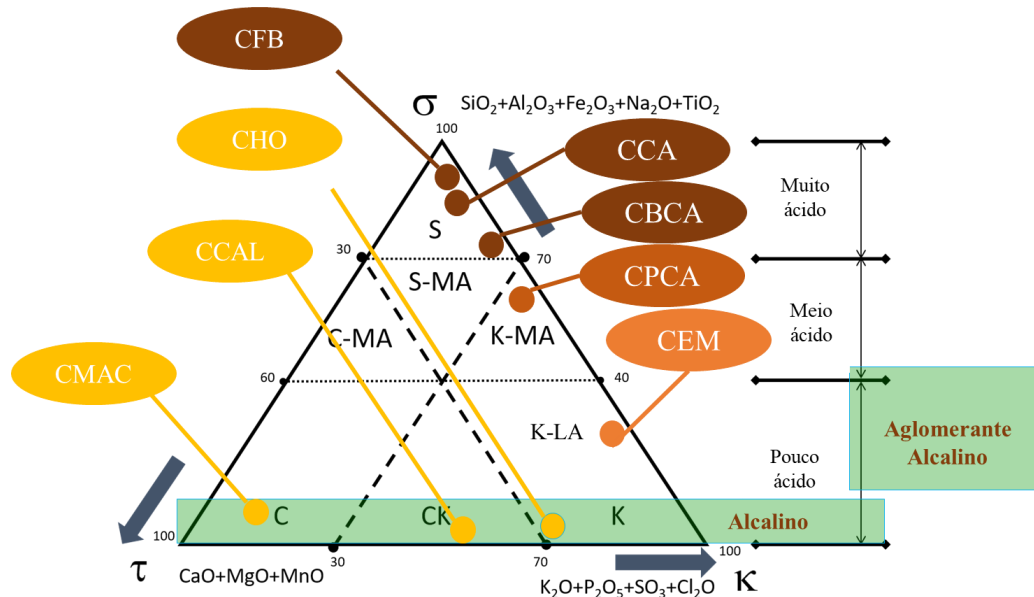
4.3. Sistemas combinados de sílica-álcalis.

Os CAA baseados no uso de cinzas alcalinas reduzem o impacto, pois em alguns casos tanto o precursor quanto o ativador vêm dos resíduos. Porém, observa-se que, frequentemente, o desempenho mecânico não é muito alto devido à deficiência de sílica no ativador. Nesse sentido, o desenvolvimento de ativadores contendo sílica e álcalis permitiria que esse efeito fosse minimizado. Font et al. (2020) projetaram o CAA com o sistema ternário ESC-CHO-CCA, no qual o ativador foi preparado por reação hidrotérmica entre CCA e CHO, a 65°C por 24 horas. Para uma dosagem de ESC-CHO-CCA de 9/4,5/1, 35,0, 46,2 e 67,4 MPa foram obtidas, para argamassas curadas por 7, 28 e 90 dias, respectivamente, a 20°C.

4.4. Classificação de cinzas de biomassa de acordo com sua reatividade.

O uso de cinzas de biomassa é uma alternativa interessante para a síntese de ativadores sustentáveis. O diagrama ternário na Fig. 4 mostra uma versão expandida do diagrama de Vassilev (Vassilev et al., 2010) sobre a classificação das cinzas de biomassa, em que as zonas de reatividade foram modificadas e diferentes tipos foram representados. Pode-se observar na zona S (parte superior do diagrama) que existe um conjunto de cinzas potencialmente muito ácidas que podem fornecer uma alta porcentagem de silicatos aos ativadores alternativos: é a cinza da casca de arroz (CCA), a cinza da folha de bambu (CFB) e cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Numa situação intermediária (Zona K-MA) encontra-se a cinza da palha da cana-de-açúcar (CPCA), que contém outros elementos em sua composição e que reduz sua contribuição para a formação de silicatos. Por fim, dentro dos materiais de baixo teor de ácido (Zona K-LA), encontra-se a cinza de espiga

de milho (CEM), que apresenta uma contribuição limitada de silício e alta proporção de potássio. Na área mais baixa do diagrama, onde estão envolvidos os óxidos mais alcalinos, basicamente CaO (extrema esquerda) e K₂O (extrema direita), três zonas se destacam: zona “C”, característica de cinzas com alto teor de cálcio, como é o caso das cinzas de madeira (CMAC); a zona “K”, com alto teor de óxido de potássio, como na cinza da casca da amêndoa (CCAL); e, por fim, a zona intermediária “CK”, na qual se encontra a cinza do osso da oliveira (CHO).

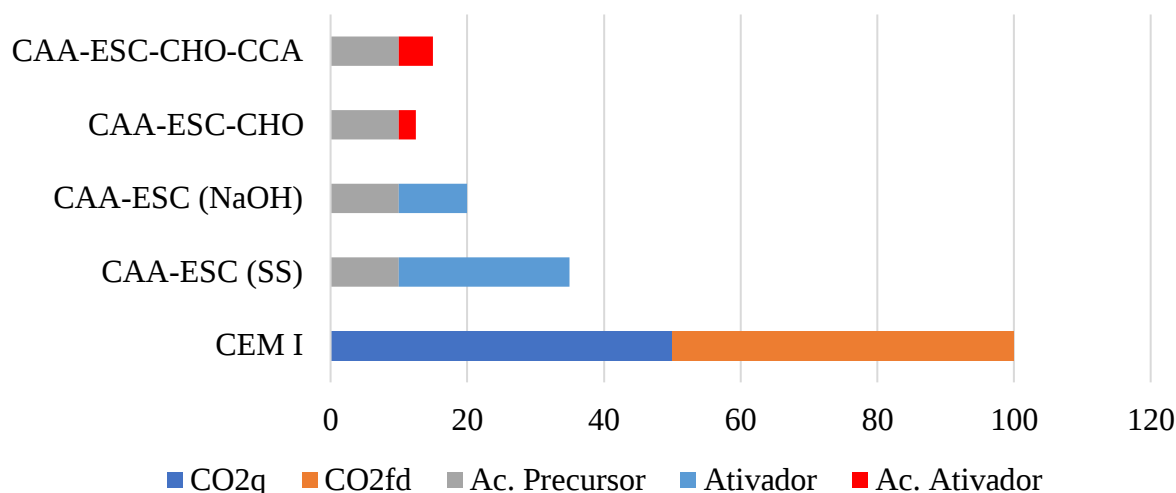


Chave: Cinza de biomassa de caroço de oliva (CHO); cinza de casca de amêndoa (CCAL); cinza de madeira com alto teor de cálcio (CMAC); cinza de espiga de milho (CEM); cinza de palha de cana-de-açúcar (CPCA); cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA); cinza de casca de arroz (CCA); cinza de folha de bambu (CFB).

Figura 4. Diagrama de Vassilev modificado (adaptado de Vassilev et al., 2010).

5. PEGADA DE CARBONO DE CIMENTOS ATIVADOS por ALCALINOS COM ATIVADORES ALTERNATIVOS

A ativação da escória com ativadores sintéticos resulta em emissões de CO₂ relativamente baixas (Fig. 2). No entanto, este aspecto pode ser melhorado ao trabalhar com ativadores alternativos. A título de exemplo, o sistema será analisado com cinza de caroço de oliveira (CHO). Para além da valorização dos resíduos (no caso da biomassa, também valorização energética), obtém-se uma ligeira diminuição do CO₂ associado. No caso do sistema ESC-CHO (Fig. 5), logicamente o condicionamento do precursor é o mesmo, devendo ser levado em consideração apenas o condicionamento do ativador (neste caso, retificação). As emissões de CO₂ associadas ao sistema ESC-CHO-RHA supõem valores superiores, uma vez que o ativador deve ser condicionado por meio do tratamento hidrotérmico da mistura CHO-RHA. Mas este novo ativador permite obter maior resistência mecânica, de forma que a emissão extra de CO₂ pode ser compensada pelo desempenho do material obtido.



Chave: CO₂q: componente químico; CO₂fd: componente de energia; Ac. precursor: condicionamento (trituração); Ativador: associado à fabricação do ativador
Ac. Ativador: condicionamento ativador (hidrotérmico).

Figura 5. Comparação das emissões relativas de cimentos CEM I com CAAs produzidos com ativadores alternativos no precursor de escória de alto forno (ESC). Ativadores comerciais: hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (SS); Ativadores alternativos, cinza de osso de oliveira (CHO) e cinza de casca de arroz (CCA). Escala relativa levando 100 para CEM I.

6. CONCLUSÕES

É evidente que o desenvolvimento de CAA envolve ter precursores e ativadores adequados. Presumivelmente, hoje não há capacidade suficiente para ter precursores em quantidade e localização suficientes para substituir completamente o cimento Portland. Por isso, é difícil propor que os CAA sejam uma solução exclusiva, mas sim que sua produção deva ser abordada do ponto de vista da complementaridade com os cimentos Portland e outros tipos de cimentos (belítico, sulfoaluminato de cálcio, à base de magnésia). O fato importante é que existem alguns ambientes onde são gerados precursores potencialmente comercializáveis (cerâmicas, resíduos de construção, diferentes tipos de escória metalúrgica) e todas as possibilidades devem ser exploradas. O mesmo ocorre com ativadores alternativos: o uso de reagentes químicos sintéticos pode ser substituído em ambientes onde haja atividades agrícolas ou industriais que possam gerar componentes adequados para a preparação do ativador. Esta circunstância pode ser de especial interesse em sociedades em desenvolvimento nas quais existe dificuldade (fundamentalmente econômica) em adquirir cimento Portland, mas que dispõem de recursos próprios para a fabricação de CAA (resíduos de construção, biomassa, ...).

Como conclusões sobre os ativadores alternativos, destacam-se as seguintes:

- Os CAA nem sempre implicam em uma redução drástica nas emissões de CO₂ associadas: deve-se considerar que, em alguns casos, as quantidades necessárias de reagentes químicos implicam em uma pegada de carbono comparável aos cimentos Portland.
- Precursores como o ESC requerem menores quantidades de ativador, o que tem como consequência que as emissões de CO₂ são menores do que no caso de outros precursores como CV ou MK.
- Os ativadores alternativos podem ser de origem agrícola ou industrial, mas em qualquer caso requerem uma caracterização completa, que integre tanto os estudos de condicionamento prévio

necessários como os potenciais problemas de sua utilização (presença de componentes químicos nocivos para algumas aplicações, tais como, por exemplo, cloretos).

d) Resíduos à base de sílica não podem ser utilizados de forma independente, devido à sua alta acidez (principalmente sílica). Os resíduos de base alcalina podem ser usados independentemente. A combinação dos dois tipos de resíduos pode melhorar o comportamento mecânico do CAA e aprimorar seus usos.

e) A utilização de resíduos sólidos como ativadores alternativos permite a produção de cimentos “one part”. Além disso, pode ser realizada uma retificação da junta do precursor e do ativador, o que melhora a mistura íntima de ambos os componentes.

7. AGRADECIMENTOS

Pelo financiamento, ao Governo de Espanha, Ministério da Economia e Competitividade (Projeto BIA2017-87573-C2-1-P) e aos fundos FEDER. M.M.T. agradece ao Ministério das Universidades do Governo de Espanha e à Universidade Politécnica de Valência pela ajuda "María Zambrano por atrair talentos internacionais" para a requalificação do sistema universitário espanhol.

8. REFERÊNCIAS

- Alonso, M. M., Gascó, C., Morales, M. M., Suárez-Navarro, J. A., Zamorano, M., Puertas, F. (2019). *Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, durability, radiology and leaching behaviour*. Cem. Concr. Compos. 104, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103384>
- Ban, C. C., Nordin, N. S. A., Ken, P. W., Ramli, M., Hoe, K. W. (2014). *The high volume reuse of hybrid biomass ash as a primary binder in cementless mortar block*. Am. J. Appl. Sci. 11, 1369–1378. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.1369.1378>
- Bejarano, J., Garazón, C., Mejía de Gutiérrez, R., Delvasto, S., Gordillo, M. (2010). In: *II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción*, Valencia, Spain, November 8-9, 2010
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejia De Gutiérrez, R., Provis, J. L., Delvasto, S. (2012). *Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash*. Waste Biomass Valor. 3, 99–108. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9093-3>
- Bouzón, N., Payá, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J. (2014). *Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders*. Mater. Lett. 115, 72-74. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>
- Choo, H., Lim, S., Lee, W., Lee, C. (2016). *Compressive strength of one-part alkali activated fly ash using red mud as alkali supplier*. Constr. Build. Mater. 125, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.015>
- De Moraes Pinheiro, S. M., Font, A., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2018). *Olive-stone biomass ash (OBA): An alternative alkaline source for the blast furnace slag activation*. Constr. Build. Mater. 178, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.157>
- Fernández-Jiménez, A., Cristelo, N., Miranda, T., Palomo, A. (2017). *Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes*. J. Clean. Prod. 162, 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151>
- Font, A., Soriano, L., Moraes, J. C. B., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2017). *A 100% waste-based alkali-activated material by using olive-stone biomass ash (OBA) and blast furnace slag (BFS)*. Mater. Lett. 203, 46-49. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.05.129>

- Font, A., Soriano, L., Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Payá, J. (2018). *Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production*. Mater. Lett. 223, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.04.010>
- Font, A., Soriano, L., de Moraes Pinheiro, S. M., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2020). *Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash*. J. Clean. Prod. 243, 118568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118568>
- EN 197-5, 2021. *Cement - Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI*.
- Gao, X., Yu, Q. L., Lazaro, A., Brouwers, H. J. H. (2017). *Investigation on a green olivine nano-silica source based activator in alkali activated slag-fly ash blends: Reaction kinetics, gel structure and carbon footprint*. Cem. Concr. Res. 100, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.06.007>
- Hall, C. (1976). *On the history of portland cement after 150 years*. Journal of Chemical Education, 53(4), 222.
- Jamieson, E., van Riessen, A., McLellan, B., Penna, B., Kealley, C., Nikraz, H. (2017). *Introducing Bayer liquor-derived geopolymers*. In: *Handbook of low carbon concrete*. Nazari, A. and Sanjayan, J.G. (eds), Kidlington, Oxford, United States: Elsevier.159-193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00008-7>
- Keijer, T., Bakker, V., Slootweg, J. C. (2019). *Circular chemistry to enable a circular economy*. Nature Chem 11, 190–195. <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0226-9>
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N. (2019). *An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials*. Resour. Conserv. Recycl. 144, 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). *One-part alkali-activated materials: A review*. Cem. Concr. Res. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Mejía, J. M., Mejía De Gutiérrez, R., Montes, C. (2016). *Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder*. J. Clean. Prod. 118, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.057>
- Mohan, S. V., Katakojwala, R. (2021). *The circular chemistry conceptual framework: A way forward to sustainability in industry 4.0*, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 28, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100434>
- Moraes, J. C. B., Font, A., Soriano, L., Akasaki, J. L., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2018). *New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator*. Constr. Build. Mater. 171, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.230>
- Pavía, S., Caro, S. (2008). *An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material*. Cons. Build. Mat. 22, 1807-1811. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.003>
- Payá, J., Monzó, J., Roselló, J., Borrachero, M. V., Font, A., Soriano, L. (2020). *Sustainable soil-compacted blocks containing blast furnace slag (BFS) activated with olive stone biomass ash (OBA)*. Sustain. 12, 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12239824>
- Peys, A., Rahier, H., Pontikes, Y. (2016). *Potassium-rich biomass ashes as activators in metakaolin-based inorganic polymers*. Appl. Clay Sci. 119, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.003>
- Phair, J. W. (2006). *Green chemistry for sustainable cement production and use*. Green chemistry, 8(9), 763-780.
- Rajan, H. S., Kathirvel, P. (2021). *Sustainable development of geopolymer binder using sodium*

- silicate synthesized from agricultural waste*. J. Clean. Prod. 286, 124959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124959>
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J. L., José Luiz P. Melges, J. L. P., Payá, J. (2015). *Microscopy characterization of silica-rich agrowastes to be used in cement binders: bamboo and sugarcane leaves*. Microsc. Microanal. 21, 1314–1326. <https://doi.org/10.1017/S1431927615015019>
- Rouseková, I., Bajza, A., Živica, V. (1997). *Silica fume-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator*. Cem. Concr. Res. 27, 1825-1828. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00191-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00191-9)
- Soriano, L., Font, A., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2020). *One-part blast furnace slag mortars activated with almond-shell biomass ash: A new 100% waste-based material*. Mater. Lett. 272, 127882. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127882>
- Tchakouté, H. K., Rüschler, C. H., Hinsch, M., Djobo, J. N. Y., Kamseu, E., Leonelli, C. (2017). *Utilization of sodium waterglass from sugar cane bagasse ash as a new alternative hardener for producing metakaolin-based geopolymer cement*. Chemie der Erde 77, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.003>
- Tong, K. T., Vinai, R., Soutsos, M. N. (2018). *Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders*. J. Clean. Prod. 201, 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 89, 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Villca, A.R., Soriano, L., Font, A., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2021). *Lime/pozzolan/geopolymer systems: Performance in pastes and mortars*. Cons. Build. Mat. 276 122208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122208>
- Vinai, R., Ntimugura, F., Cutbill, W., Evans, R. (2021). *Production of sodium silicate from bamboo leaf ash for alkali activation of binders*. Open Research Exeter. <https://ore.exeter.ac.uk/repository/bitstream/handle/10871/125925/Vinai%20et%20al.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Weil, M., Dombrowski, K., Buchwald, A. (2009). *Life-Cycle analysis of geopolymers*. In: Provis and van Deventer (ed), Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>

Análise da autorregeneração de matrizes cimentícias através de diferentes métodos de inserção de soluções químicas e bacterianas

F. Pacheco^{1*} , A. Loeff² , V. Müller³ , H. Z. Ehrenbring¹ , R. Christ⁴ ,
R. C. E. Modolo³ , M. F. Oliveira⁵ , B. F. Tutikian³ 

* Autor de Contato: fernandapache@unisinos.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

Recepção: 28/10/2021 | Aceitação: 07/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este estudo analisou o potencial de cicatrização do concreto quando do uso de soluções bacterianas e soluções químicas, avaliando diferentes materiais que podem ser empregados para seu encapsulamento. Para encapsular os agentes, foram empregadas argila expandida e perlita expandida. Para analisar a eficácia da cicatrização, realizaram-se as técnicas de análise visual através de microscópio óptico de alta precisão e microtomografia 3D. Os resultados apontaram para um melhor desempenho do traço BAC.AE (soluções bacterianas encapsuladas em argila expandida), utilizando solução bacteriana encapsulada em argila expandida, que foi capaz de cicatrizar fissuras de até 0,57mm, tendo os traços BAC.PE (soluções bacterianas encapsuladas em perlita expandida) e SS (silicato de sódio) inserido na moldagem, em substituição à água, cicatrizado fissuras de 0,16 mm e 0,29 mm respectivamente.

Palavras-chave: bioconcreto; autorregeneração; aut cicatrização; fissuras; bactérias.

Citar como: Pacheco, F., Loeff, A., Müller, V., Ehrenbring, H. Z., Christ, R., Modolo, R. C. E., Oliveira, M. F., Tutikian, B. F. (2022), "Análise da autorregeneração de matrizes cimentícias através de diferentes métodos de inserção de soluções químicas e bacterianas", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 32 – 46, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

¹ Itt Performance, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

² Civil Engineering Undergraduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

³ Civil Engineering Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

⁴ Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Barranquilla Colombia

⁵ Architecture Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Pacheco ofereceu a ideia original. Muller e Loeff foram os responsáveis pela experimentação. Ehrenbring e Cristo fizeram os testes e análises. Modolo, Tutikian e Oliveira trabalharam na interpretação dos resultados e como revisores.

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Evaluation of concrete self-healing with different insertion techniques of chemical and bacterial solutions

ABSTRACT

This study evaluated the self-healing potential of concrete with chemical and bacterial solutions encapsulated in different materials. The encapsulating materials were expanded clay (EC) and expanded perlite (EP). Self-healing effectiveness was evaluated visually with a high-precision optical microscope and 3D microtomography. Results pointed to improved performance of bacterial solutions encapsulated in expanded clay (BAC.EC) which were able to heal fissures of 0.57 mm. In contrast, bacterial solutions encapsulated in expanded perlite (BAC.EP) and sodium silicate replacing water during molding (SS) healed fissures of 0.16 mm and 0.29 mm, respectively.

Keywords: bioconcrete; self-healing; self-repairing; fissure; bacteria.

Análisis de la autorregeneración de matrices cementosas mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas

RESUMEN

Este estudio analizó el potencial de curación del hormigón al utilizar soluciones químicas y bacterianas, evaluando diferentes materiales que se pueden utilizar para su encapsulación. Para encapsular los agentes se utilizaron arcilla y perlita expandidas. Para analizar la efectividad de la curación, se realizaron técnicas de análisis visual utilizando un microscopio óptico de alta precisión y microtomografía 3D. Los resultados apuntaron a un mejor desempeño de la mezcla BAC.AE (solución bacteriana encapsulada en arcilla expandida), utilizando solución bacteriana encapsulada en arcilla expandida, que fue capaz de cicatrizar grietas de hasta 0.57mm. Las mezclas BAC.PE (solución bacteriana encapsulada en perlita expandida), solución bacteriana encapsulada en perlita expandida, y SS (silicato de sodio), solución química agregada en el momento de la mezcla para reemplazar el agua, cicatrizaron grietas de 0.16 mm y 0.29 mm respectivamente.

Palabras clave: biohormigón; autorregeneración; autocuración; fisuras; bacterias.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O concreto apresenta inúmeras vantagens que conduzem à sua elevada aplicabilidade (SEIFAN et al, 2016), todavia, o material sofre deterioração. Percebe-se que a sustentabilidade das estruturas não pode ser alcançada se necessitarem de constantes reparos e ajustes. Desta forma, é fundamental que haja um aprimoramento na durabilidade dos concretos, especialmente nos países de terceiro mundo, onde mais costumam ocorrer as falhas prejudiciais da indústria da construção (Chemrouck, 2015).

A durabilidade do concreto pode ser descrita como sua capacidade de resistir à deterioração, sendo essa degradação proveniente da exposição ao clima ou da abrasão da superfície (Achal et al, 2011), considerando-se que existem diferentes condições de exposição ambiental (Gjorv, 2016). Atualmente, as maiores responsáveis pela degradação do concreto são as fissuras, devido à diversas causas. Para minizar tais dados, é uma tendência o estudo dos SHC - *Self Healing Concrete* (Azarsa et al, 2019), ou concretos autocicatrizantes, objeto de estudo deste trabalho.

A ideia principal do concreto autocicatrizantes é que se deve fornecer as condições necessárias para que os agentes presentes na matriz cimentícia possam preencher as fissuras uma vez que elas tenham ocorrido. Nas últimas décadas, pesquisas nessa área apontaram muitas estratégias inovadoras (Wu et al., 2012), dentre elas, uso de agentes de cicatrização em fibras ocas, seu micro-encapsulamento (White et al, 2001), inserção de agentes expansivos e aditivos minerais (Kishi; Ahn, 2010), materiais de memória de forma (Abdulridha et al., 2012) e soluções bacterianas (Krishnapriya et al, 2015).

A adição de soluções bacterianas em matrizes cimentícias tem se mostrado uma possibilidade promissora e sustentável (Krishnapriya et al, 2015; Wang et al, 2017; Rais e Khan, 2021). Esta técnica de autocura se dá pela adição de cápsulas de algum material específico contendo as bactérias, que podem permanecer inativas durante décadas, juntamente com um nutriente, como o lactato de cálcio (Jiang et al, 2020). Dessa forma, quando as cápsulas se rompem com a fissuração do concreto e há umidade, as bactérias se tornam ativas e produzem calcita (Patel, 2015). As bactérias utilizadas devem ter capacidade de suportar a alta alcalinidade do cimento e a pressão de compressão interna da matriz cimentícia onde está inserida. Também deve ser fornecida uma fonte de nutriente para a alimentação das bactérias (Li; Herbert, 2012; Stanaszek-Tomal, 2020).

Além da solução bacteriana, a solução química também tem se mostrado uma alternativa eficaz para o fechamento de fissuras na matriz do concreto (Alghamri et al, 2016). Nos estudos realizados por Huang et al. (2011) e Pelletier et al. (2011) foram utilizadas cápsulas esféricas para encapsular uma solução de silicato de sódio, que quando rompidas liberaram a solução na matriz, onde ocorreu a reação com hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que curou a fissura do concreto.

Dados os atuais e complicados processos de encapsulamento em desenvolvimento, é notável a improbabilidade de suas aplicações em escala real. Nota-se uma escassez de estudos que comparem diferentes métodos de encapsulamento para as soluções bacterianas e químicas inseridas na matriz cimentícia, portanto, este estudo conduz uma análise comparativa, com encapsulamento de bactérias em perlita e argila expandida, e também a eficácia da utilização de silicato de sódio diretamente na água de amassamento.

2. FISSURAÇÃO E AUTOCICATRIZAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

As fissuras são consideradas as manifestações patológicas características das estruturas de concreto e chamam a atenção para o fato de que algo de anormal está acontecendo (Bianchini, 2008). Ferrara et al (2018) citam que minimizar a ocorrência das fissuras ainda é um desafio para os concretos.

Lottermann (2013) explica que algumas das causas mais usuais do fissuramento das estruturas são: cura mal realizada; retração; variação de temperatura; agressividade ambiental; carregamento; erros de execução e de detalhamento de projeto e recalques dos apoios. As fissuras podem ser divididas entre as que se originam no estado fresco e aquelas que surgem no concreto após seu endurecimento. Podem ainda ser motivadas por mais de uma causa simultaneamente (Gupta; Pang; Kua, 2017). Considerando o efeito que as fissuras exercem na durabilidade, suas aberturas limites são abordadas em normas nacionais e internacionais (Carmona Filho; Carmona, 2013). Na norma brasileira, por exemplo, as fissuras permitidas encontram-se na faixa de valor entre 0,2 e 0,4mm (ABNT, 2014).

Por mais que estudos anteriores tenham sido conduzidos nessa temática, o marco inicial mais aceito na literatura, e que mudou a postura acerca do tema, foi a pesquisa de Dry, em 1994. Os estudos conduzidos por Dry (1994 apud Bianchin, 2018) propuseram o uso de polímeros encapsulados para obter o concreto autocicatrizante. Além disso, foi proposto não apenas a descrição dos fenômenos envolvidos e suas possíveis causas, mas também o uso intencional dessas propriedades com a finalidade de obter um material mais durável.

Desde 2005, dois comitês técnicos já foram criados para o estudo dos fenômenos de autocicatrização em matérias de base cimentícia (Cappellesso, 2018). Parece haver um consenso no meio técnico de que concretos autocicatrizantes sejam aqueles com o fechamento das fissuras e concretos autorregenerantes como os que envolvem ainda a recuperação de propriedades mecânicas (Pacheco, 2020). Há ainda a diferenciação relacionada aos mecanismos utilizados para tal, divididos entre autógenos e autônomos. Autógeno refere-se à quando o processo utiliza materiais que poderiam estar presentes na composição do concreto e que não são especificamente utilizados para a autocicatrização. Já o procedimento autônomo considera o uso de materiais que não seriam encontrados na composição e foram apenas adicionados para este fim. Os mecanismos autógenos não foram estudados nessa pesquisa, sendo amostras com pozolanas ou cimento.

A cicatrização por mecanismos autônomos são as baseadas em microcápsulas preenchidas com agentes cicatrizantes ou tubos vasculares (Van Tittelboom et al., 2011; Wan et al, 2021). Entre os agentes de cicatrização têm-se soluções químicas, soluções bacterianas, polímeros superabsorventes (PSA), aditivos redutores de permeabilidade, expansivos, entre outros. Como encapsulamento, podem ser usados materiais porosos, agregados leves, entre outros. Mila et al (2019) afirmam que a disposição em cápsulas do material favorece a presença de produtos de cicatrização ao longo da matriz.

O encapsulamento de soluções químicas corresponde a impregnação de agregados leves e porosos com alguma solução química (Alghamri; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016). Souradeep e Kua (2016) explicam que os agentes são liberados pela ruptura das cápsulas. Após liberação, os agentes cicatrizantes penetram na fissura por meio de capilaridade. Souradeep e Kua (2016) afirmam que a estratégia de encapsulamento é capaz de aumentar a vida útil de agentes químicos ou biológicos de cura, garantindo recuperação e maior durabilidade ao concreto. Em termos das soluções químicas, nota-se o uso de silicato de sódio como uma possibilidade (Manoj-Prabakar et al., 2017). A aplicação de bactérias para remediação de fissuras consiste na produção de calcita (CaCO_3) (Xu et al, 2020) que é inócua ambientalmente, quando comparada a polímeros sintéticos usados para reparos de concreto atualmente. Sobre elas, há algumas diferentes abordagens no uso, podendo ser utilizada a precipitação de carbonato de cálcio através da hidrólise bacteriana da ureia (Elzêbio; Alves; Fernandes, 2017), assim como a incorporação de esporos bacterianos e compostos orgânicos no concreto (Schwantes-Cezario et al., 2017).

Um fator que pode afetar as bactérias é o pH muito alcalino do concreto. Outro aspecto é que as células da bactéria podem ser destruídas durante o processo de hidratação do cimento. Por isso, o encapsulamento é uma estratégia de proteção desses seres (Jonkers; Thijssen, 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição dos traços realizados nessa pesquisa. O traço referência é baseado no estudo de Schwantes-Cezario et al. (2019).

Tabela 1. Variáveis do estudo.

Traço	Cimento	Areia	Perlita	a/c	Agente cicatrizante
Referência	1,00	1,00	-	0,36	-
BAC.PE	1,00	0,7	0,064	0,36	<i>B.subtilis</i>
BAC.AE	1,00	0,7	0,147	0,36	<i>B.subtilis</i>
SS	1,00	1,00	-	0,18	Silicato de sódio

Nos traços BAC.AE e BAC.PE foi feita a substituição de 30% da massa de areia pelo volume correspondente de argila expandida (AE) e de perlita expandida (PE), respectivamente. No traço SS foi utilizado aditivo superplastificante a base de policarboxilatos para adequação da fluidez, sendo o teor utilizado de 0,89% em relação à massa de cimento. Em cada um dos traços foram realizados os ensaios de compressão, tração na flexão (para indução da fissura), análise visual e microtomografia 3D, visando a identificação dos vazios.

3.1 Materiais

O cimento utilizado no estudo foi o cimento Portland tipo CP II-F-40, com uso de fíler e sem adições pozolânicas. A areia utilizada neste estudo foi areia quartzosa extraída de rios. A massa unitária obtida da areia foi de 1.592,16 kg/m³ e a massa específica de 2.427,36 kg/m³. A obtenção da granulometria da areia, apresentada na Figura 1, foi realizada através de ensaios de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Como solução química foi utilizado silicato de sódio neutro, em estado líquido, um composto de fórmula Na₂SiO₃, devido a sua alta compatibilidade com matrizes cimentícias, sendo ele diluído no teor de 50% em água deionizada, motivo pelo qual a relação água/cimento deste traço é metade dos anteriores.

A espécie de bactéria utilizada na solução bacteriana do programa experimental é a *Bacillus subtilis* AP 91, oriunda da unidade de Campinas da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Os procedimentos de verificação da curva de crescimento e preparo constam no estudo de Pacheco (2020). Uma solução tampão estéril contendo 1,06 g/L de fosfato de sódio (dibásico anidro), 0,36 g/L de fosfato de sódio (monobásico) e 8,17 g/L de sódio cloreto em água deionizada foi utilizado como diluente da bactéria para fins de encapsulamento e posterior inserção na mistura cimentícia.

A PE foi fornecida pela empresa Pervale Minerais, com granulometria entre 2 e 4mm, tendo sido peneirada antes da utilização para adequação à esta faixa granulométrica. A determinação da massa unitária foi realizada para o material em sua condição natural e para o material impregnado com a solução bacteriana e revestido com cimento, obtendo valores de 128,43 kg/m³ e 328,52 kg/m³, respectivamente. A determinação da granulometria da perlita (apresentada na Figura 2) foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

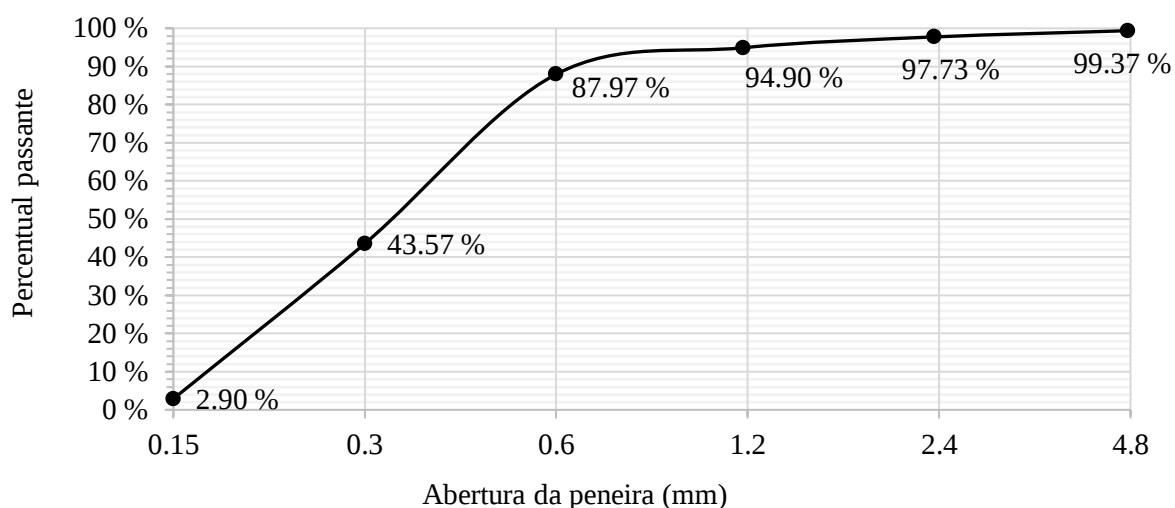


Figura 1. Distribuição granulométrica da areia.

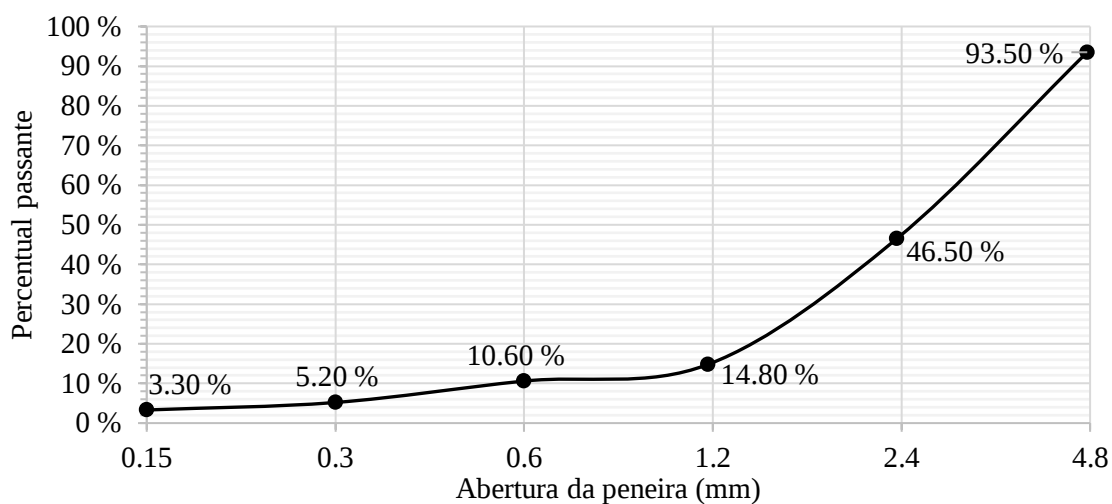


Figura 2. Distribuição granulométrica da perlita expandida.

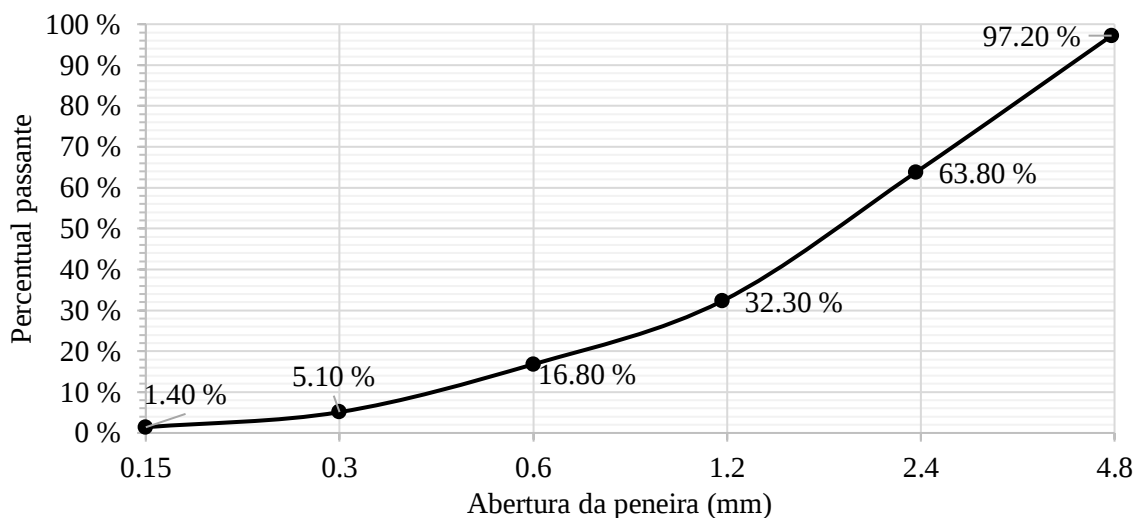


Figura 3. Distribuição granulométrica da argila expandida.

A AE utilizada foi do tipo 0500, adquirida com a empresa Global Minérios, com granulometria entre 2 e 4mm. Para sua caracterização foram realizados os ensaios de massa unitária e da determinação granulométrica (ver Figura 3), de acordo com as normas NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. A determinação da massa unitária foi realizada em condição natural e para o material impregnado com a solução bacteriana e revestido com cimento, com valores de 930,39 kg/m³ e 1395,48 kg/m³, respectivamente.

A composição química da perlita expandida e da argila expandida são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química dos agregados leves utilizados para encapsulamento

Elemento	AE		PE	
	Massa %	Atômica %	Massa %	Atômica %
O	42.80	58.92	43.05	57.65
Na	0.43	0.41	2.27	2.12
Mg	1.78	1.61	0.00	0.00
Al	10.23	8.35	7.18	5.70
Si	30.87	24.22	40.70	31.04
K	4.48	2.52	4.76	2.61
Ca	1.16	0.64	0.62	0.33
Ti	1.15	0.53	0.00	0.00
Fe	7.10	2.80	1.41	0.54
Total	100.00		100.00	

3.2 Métodos

Para as análises realizadas, foram moldados um total de 27 corpos de prova cilíndricos (50 x 100mm) e 9 corpos de prova prismáticos (60 x 60 x 180mm), conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), respectivamente, e 3 corpos de prova cilíndricos (8 x 30mm). As amostras de formato prismático foram reforçadas com uma barra de aço CA 60 de 5mm de diâmetro, posicionadas a 2cm da base, para que a amostra não sofresse ruptura frágil. Após a desforma, as amostras foram curadas em câmara com umidade e temperatura controlada, conforme a NBR 5738 até a idade de realização dos ensaios, em 7, 14 e 35 dias (ABNT, 2015).

3.2.1 Encapsulamento da solução bacteriana

O procedimento com a solução bacteriana envolveu imersão das cápsulas na solução e sua saturação em dessecador à vácuo, como realizado por Alghamri et al (2016) e Sisomphon; Copuroglu e Fraaij, (2011). Após finalizada a impregnação, a PE e a AE foram encaminhadas à estufa por 48 horas à 45 °C, como realizado por Zhang et al. (2017). Juntamente com a solução bacteriana foi disposto o nutriente de lactato de cálcio. Para proporcionar uma envoltória de proteção, foram dispostas camadas de cimento ao redor dos agregados, visando a formação de uma crosta de proteção. Em relação ao encapsulamento, verificou-se a massa dos agregados inicialmente e posteriormente o encapsulamento. Mais detalhes desse procedimento experimental podem ser verificados no estudo de Pacheco (2020).

3.2.2 Ensaios

A resistência à compressão do concreto foi obtida pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Para formação de fissuras, as amostras prismáticas foram submetidas ao ensaio de tração na flexão por 3 pontos, pela NBR 13279 (ABNT, 2005). As análises visuais da cicatrização ocorreram na idade inicial e aos 7, 14 e 35 dias. Foi realizado ensaio de microtomografia 3D para verificar a distribuição de vazios no material. Para este ensaio foram utilizadas amostras de formato cilíndrico de 8x30mm,

sendo analisada uma amostra por traço.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão, da análise visual e da microtomografia 3D são apresentados nos itens a seguir.

4.1 Resistência mecânica à compressão

Os resultados obtidos para resistência à compressão são apresentados na Figura 4. Pode-se perceber, que a resistência à compressão se manteve muito semelhante ao longo do tempo, o que pode decorrer do cimento utilizado, que já apresenta alta resistência logo nas primeiras idades. A maior diferença encontrada se dá no traço SS, com uma diferença de 4,7 MPa (11,63%) de resistência, entre os 14 e 35 dias. O SS pode ter gerado nesse período C-S-H decorrente da sua ativação, por não depender da fissuração para atuar (GIANNAROS et al, 2016). Também é importante observar que houve uma diferença expressiva na resistência ao comparar os diferentes traços, sendo observado que o traço BAC.AE adquiriu uma resistência muito maior do que os outros dois traços utilizados, com até 12,7 MPa de diferença aos 35 dias. É possível que esta diferença ocorra, pois, a massa unitária da perlita é menor que a da argila, sendo que ambas foram adicionadas às misturas em granulometrias semelhantes.

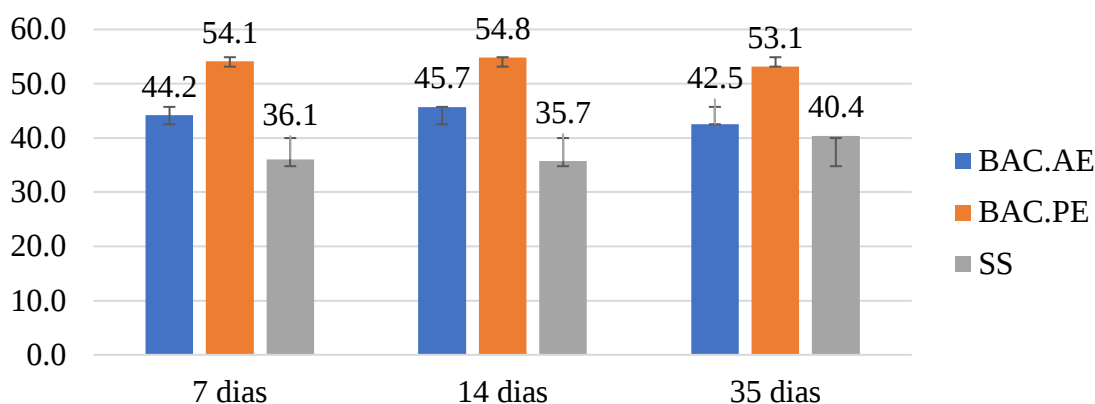


Figura 4. Resistência à compressão média das amostras.

Conforme estudo realizado por Schwantes-Cezario et al (2017), com traço usado nesse estudo, a resistência a compressão encontrada nas amostras deveria ter um valor médio de 65 MPa, porém, este valor não foi atingido em função da inserção de agregado leve na mistura, uma vez que, segundo Jonkers (2011), o uso deste tipo material reduz a resistência à compressão. Porém, este parâmetro não pode ser utilizado ao avaliar o traço SS, uma vez que ele não leva agregados leves em sua composição, ficando assim, o motivo do decréscimo em sua resistência associados à possível hidratação não completa do cimento, devido à baixa relação água/cimento da mistura.

4.2 Análise visual superficial

Destacam-se algumas manifestações verificadas nos traços. No traço BAC.PE, percebeu-se a formação de produtos de cicatrização em fissuras secundárias da amostra, e sua deposição superficial, vide Figura 5.

Como é possível destacar, aparentemente, a limitação das fissuras cicatrizadas decorre da sua abertura máxima. Na fissura principal evidenciada nessa amostra não se percebeu a formação de produtos de cicatrização. Na bibliografia fala-se sobre a cicatrização se limitar a fissuras de

menores dimensões (ZHANG et al., 2016; JIANG et al., 2020). Percebeu-se nas amostras que o produto de cicatrização ocorre no formato de placa. A bibliografia afirma que esse formato de placa é atribuído a presença de calcita, produto esperado em soluções bacterianas (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; ALGHAMRI et al., 2016). Em relação ao traço contendo bactérias em AE, percebeu-se a formação de produtos no interior da fissura, conforme a Figura 6.

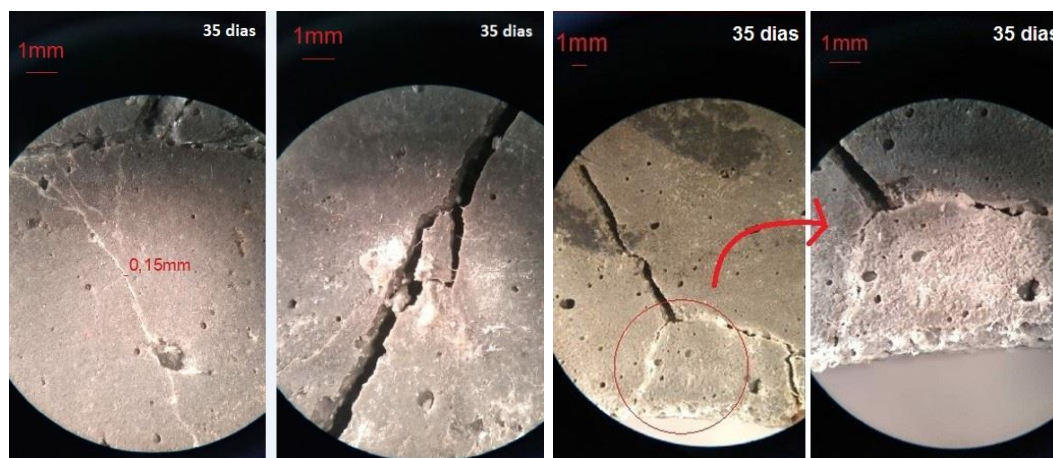


Figura 5. Autocicatrização no traço BAC.PE – Amostra 1.

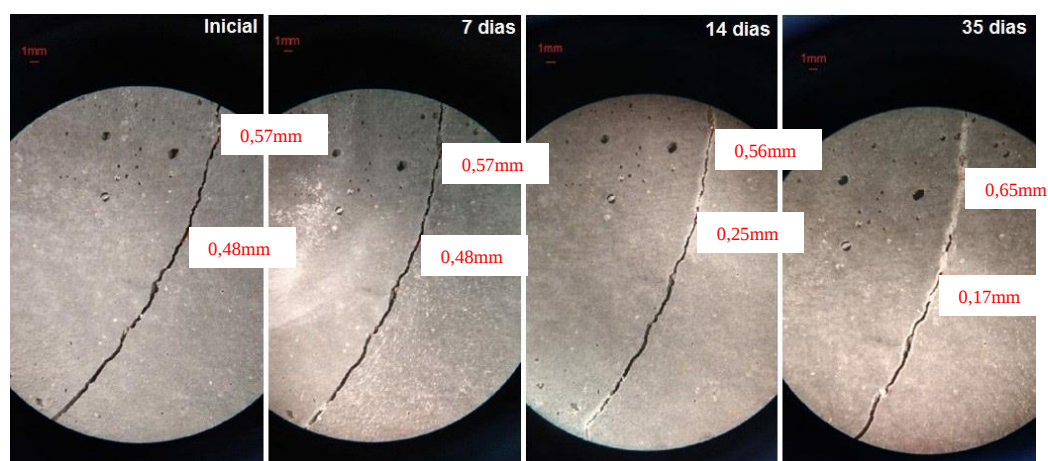


Figura 6. Autocicatrização no traço BAC.AE – Amostra 2.

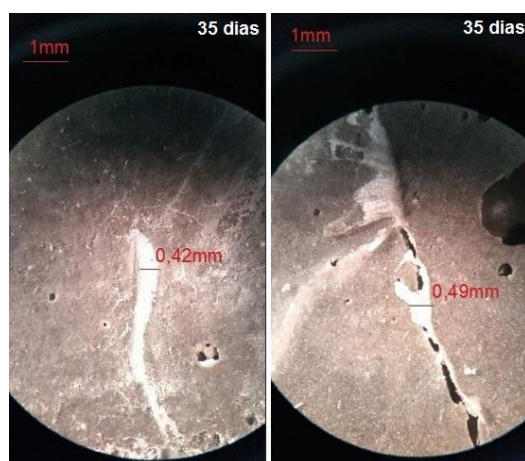


Figura 7. Autocicatrizações no traço BAC.AE – Amostras 3 e 1.

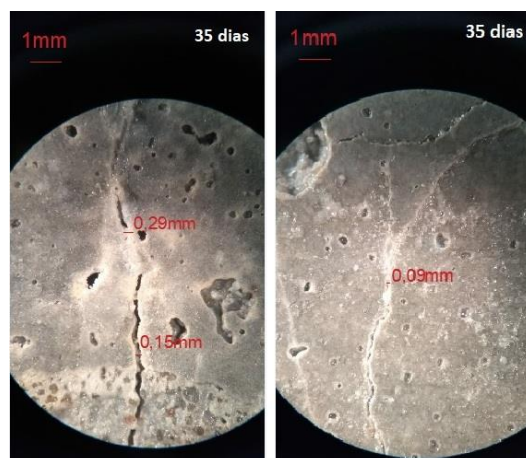


Figura 8. Autocicatrização no traço SS – Amostras 1 e 2.

Houve cicatrização em vários pontos ao longo da fissura, sendo a maior largura de fissura completamente selada de 0,57mm. Percebeu-se o caráter progressivo da cicatrização, sendo a fissura inicial de 0,48mm com apenas 0,17mm na idade final, concordando com Zhang et al. (2017). Outra observação que pode ser feita é que a distribuição do produto não foi uniforme na fissura, o que pode decorrer da disponibilidade da perlita no local para a liberação do produto de regeneração e consequente formação de calcita, o que condiz com o estudo realizado por Alghamri et al. (2016).

Na Figura 7, apresenta-se o traço BAC.AE com cicatrização de 0,42mm e 0,49mm respectivamente. Observa-se que não apenas ocorreu a formação de produto de cicatrização, como sua formação se deu em espessura superior a abertura inicial, indicando depósito na superfície da amostra. Esse tipo de ocorrência é atribuído a presença de calcita, como já citado. Os autores Rais e Khan (2021) encontram aspecto semelhante ao da cicatrização verificada nessa pesquisa.

Referente ao traço SS, a Figura 8 apresenta uma fissura com abertura inicial de 0,31mm e final de 0,09mm. Também é importante destacar que houve uma cicatrização em placas pontuais em ambas as amostras, visíveis ao microscópio a partir da idade de 14 dias. Isso pode ser atribuído à existência de pequenos poros superficiais que permitem o acúmulo de água, criando assim um ambiente favorável à autocicatrização. No traço SS, a espessura máxima de fissura cicatrizada foi de 0,29mm, apresentada na amostra 1.

Por fim, é interessante observar que a cicatrização, em todas as amostras, ocorre prioritariamente de maneira pontual. Esse comportamento se dá, provavelmente, devido à dispersão das cápsulas na estrutura interna das amostras. No traço SS pode ter ocorrido falhas na dispersão do silicato de sódio, o que condiz com apontamentos feitos por Van Tittelboom e de Belie (2013). Ainda, percebeu-se que a cicatrização começa a se formar na parede das fissuras, encaminhando-se gradativamente para o centro, corroborando com o estudo de Al-Tabbaa et al. (2019).

Ao comparar com a bibliografia, é visto que Zhang et al. (2017), recuperaram fissuras de até 0,79mm aos 28 dias de cura, sendo esta diferença provavelmente constatada devido aos autores utilizarem outro material regenerante, especificamente, a bactéria *Bacillus cohnii* encapsulada em perlita e revestida com geopolímero. Da mesma forma, Jiang et al. (2020), ao estudarem o encapsulamento de *B. cohnii* em perlita expandida conseguiram selar fissuras de até 0,4mm, valor muito próximo aos encontrados no presente trabalho. Liu et al (2021) relatam a cicatrização de 0,25mm.

Ainda em comparativo com a bibliografia, Van Tittelboom e de Belie (2013), provam que não há linearidade na cicatrização da fissura, conforme apresentado nos resultados. Isto ocorre, pois a cicatrização só acontece se há disponibilidade de material regenerante, sendo assim, onde não há indícios de cicatrização, não há agente regenerante suficiente disponível para que ocorra o

fechamento da fissura. A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a espessura máxima cicatrizada em cada amostra do estudo.

Tabela 3. Resumo dos resultados.

Traço	Amostra	Espessura máxima cicatrizada
BAC.PE	1	0,16 mm
	2	0,14 mm
	3	0,12 mm
BAC.AE	1	0,38 mm
	2	0,57 mm
	3	0,42 mm
SS	1	0,29 mm
	2	0,22 mm
	3	Não ocorreu cicatrização

Finalmente, podemos constatar que o traço BAC.AE foi capaz de cicatrizar fissuras com espessuras expressivamente maiores do que ambos os outros traços, uma vez que a maior dimensão selada por ele foi de 0,57mm, enquanto os traços BAC.PE e SS cicatrizaram 0,16mm e 0,29mm, respectivamente. Dito isso, conclui-se que o traço que apresentou melhor eficiência na análise visual das fissuras foi o traço BAC.AE, devido à sua maior quantidade de fissuras seladas e por apresentar as maiores espessuras cicatrizadas.

4.3 Microtomografia 3D

O ensaio de microtomografia 3D foi realizado no Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (itt Fuse), na Unisinos. A Figura 9 apresenta os resultados gerados pela microtomografia para o traço BAC.PE. É possível perceber que a PE utilizada na mistura, facilmente detectada pela coloração amarela, encontra-se distribuída de forma regular ao longo da amostra, com apenas alguns pontos com acúmulo de agregado. Esta distribuição é favorável uma vez que ocorram as fissuras, pois haverá uma maior probabilidade de elas encontrarem e romperem cápsulas de PE, liberando o agente cicatrizante. Além disso, apresentam-se vazios no percentual de 11,45% em proporção ao volume total da amostra ensaiada, valor esse que condiz com os resultados à compressão apresentados anteriormente, uma vez que concretos mais porosos costumam ter resistências mais baixas (YANG; JIANG, 2003).

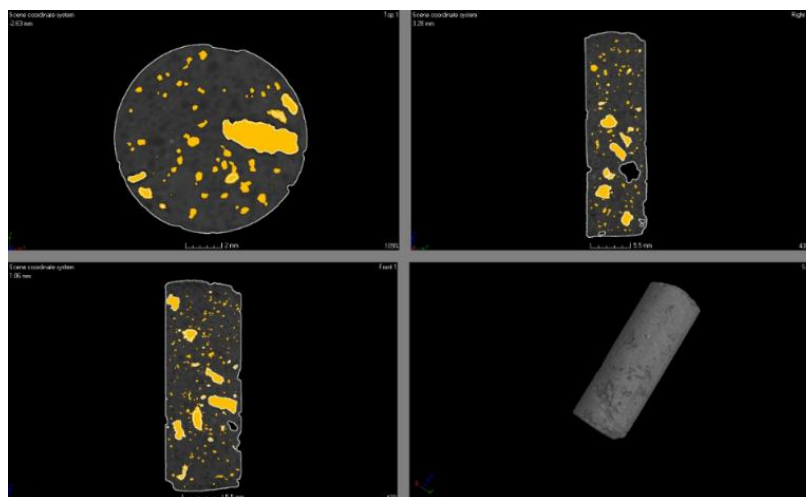


Figura 9. Microtomografia do traço BAC.PE.

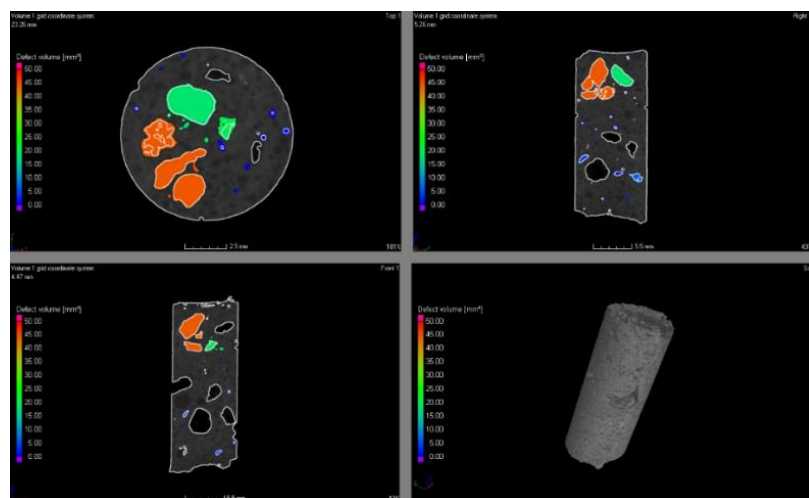


Figura 10. Microtomografia do traço BAC.AE.

É possível observar, na Figura 10, que no traço BAC.AE há uma má distribuição da AE na estrutura interna da amostra ensaiada, sendo a AE os pontos com diferentes colorações dentro da amostra, o que pode ter impactado na distribuição do agente cicatrizante. O percentual de vazios encontrado para esta amostra ensaiada é de 8,38% em proporção ao seu volume, o que pode estar relacionado à maior resistência à compressão observada para este traço.

Por fim, a Figura 11, apresenta os resultados da microtomografia para o traço SS, onde é possível observar uma distribuição adequada dos constituintes da mistura ao longo de toda a amostra, situação essa que, assim como apontado anteriormente, é favorável à formação de produto cicatrizante em toda a superfície da argamassa. O percentual de vazios encontrado nesta amostra é de 2,28% em proporção ao seu volume total.

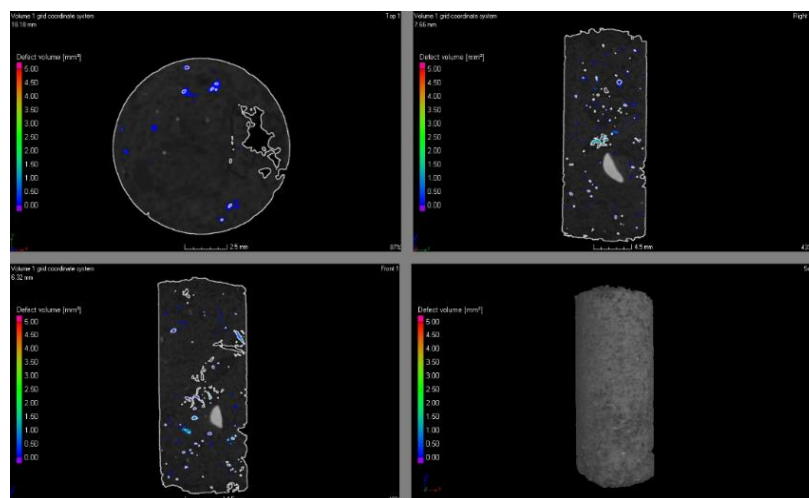


Figura 11. Microtomografia do traço SS.

Sobre a microtomografia do traço SS, é pertinente destacar que a amostra a que se refere não contém agregados leves, e assim, o percentual verificado de vazios é atribuído a falhas na compactidade, a presença de zona de transição e os vazios entre os materiais.

Analisando comparativamente os vazios das três amostras, percebe-se que os dois traços contendo AE e PE apresentaram valores muito superiores, isso pois, mesmo após a impregnação com solução bacteriana a estrutura porosa da PE se manteve, o que resultou nessa identificação de vazios. No traço SS, de maior compactidade, percebeu-se índice muito inferior. Sobre isso, cabe citar que não

se percebem danos na incorporação do SS diretamente na matriz.

Conforme Zhang et al (2021) pontuam, há influência em relação a distribuição das cápsulas e dos vazios em um concreto autocicatrizante uma vez que tais pontos influenciaram na distribuição do agente de promotor da autocicatrização. Ainda que se reconheça tal influência, não foi percebida uma relação entre o percentual de vazios detectado e a cicatrização máxima registrada. Pontua-se assim, a necessidade de análise da distribuição dos poros capilares e não sua quantificação em termos de volume total.

Madalena, Taha e Garder (2021) avaliaram os poros de concretos autocicatrizantes, e perceberam que assim como a cura ocorre na fissura, os produtos podem se formar nos vazios presentes no material. Em relação a isso, levanta-se a necessidade de análise da porosidade ao longo do tempo, o que pode melhorar a microestrutura do concreto, porém, pode impactar na distribuição do produto de cicatrização.

5. CONCLUSÃO

O ensaio de resistência mecânica apontou que o traço com melhor desempenho mecânico foi o do traço BAC.AE, com 53,1 MPa aos 35 dias, comparado à 42,5 MPa e 40,4 MPa referentes aos traços BAC.PE e SS, respectivamente. Além disso, foi também o traço BAC.AE que apresentou maior capacidade de cicatrização quando realizada análise superficial dos CPs, tendo como fissura máxima selada 0,57mm. Nos traços BAC.PE e SS o valor máximo foi de 0,16mm e 0,29mm, respectivamente.

Houve formação de produtos no interior das fissuras, principalmente no traço SS. A cicatrização das fissuras ocorreu mais pontualmente que ao longo de toda sua extensão.

Através da análise da microtomografia 3D, foi possível verificar que os materiais constituintes da argamassa estavam bem dispersos dentro das matrizes cimentícias.

Dessa forma, de posse de todos estes dados, é possível concluir que o traço mais eficiente, de forma geral, foi o traço BAC.AE. Do ponto de vista da produção e aplicação em larga escala, no entanto, há benefícios e possibilidade de emprego do traço SS, uma vez que os procedimentos envolvidos na impregnação das cápsulas são eliminados do processo produtivo do concreto.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao itt Performance pelo apoio na realização da presente pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

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 (2015), *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M. S. (2011), *Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 38:1229-1234, <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-010-0901-8>
- Al-Tabbaa, A., Litina, C., Giannaros, P., Kanellopoulos, A., Souza, L. (2019), *First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 208:669-685, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016), *Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 124:910-921, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>
- Carmona Filho, A., Carmona, T. (2013), “*Fissuração nas estruturas de concreto*”. Boletim Técnico ALCONPAT Internacional.
- Cappellesso, V. G. (2018), “*Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Chemrouk, M. (2015), *The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete*. Procedia Engineering. 125:713-724, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.112>
- Gupta, S., Pang, S. D., Kua, H. W. (2017), *Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review*. Construction and Building Materials. 146:419-428, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>
- JIANG, L. et al. *Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications*. Construction and Building Materials, v. 232, p. 117222, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117222>
- Jonkers, H. M. (2011), *Bacteria-based self-healing concrete*. Frankfurter Afrikanistische Blätter. 8:49-79.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A. (2010). “*Bacteria Mediated Remediation of Concrete Structures*” in: K. van Breugel, G. Ye, Y. Yuan (Eds.), 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, [S. l.], pp. 833-840.
- Krishnapriya, S., Babu, D. L. V., Arulraj, G. P. (2015), *Isolation and identification of 60 bacteria to improve the strength of concrete*. Microbiological Research. 174:48-55, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.03.009>
- Li, V. C., Herbert, E. (2012), *Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure*. Journal of Advanced Concrete Technology. 10:207-218, <https://doi.org/10.3151/jact.10.207>
- LIU, C et al. (2021), *Experimental and analytical study on the flexural rigidity of microbial self-healing concrete based on recycled coarse aggregate (RCA)*. Construction and Building Materials, Vol 85, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122941>
- Lottermann, A. F. (2013), “*Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso*”, Monografia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, p. 66.
- Maddalena, R., Taha, H., Gardner, D. (2021), *Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: sorptivity and pore structure*. Developments in the built environment, Vol 6, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100044>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. IBRACON, São Paulo, Brasil, p. 782.
- Milla, J. et al. (2019), *Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate*. Construction and Building Materials, v. 201, p. 526–538, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.193>

- Pacheco, F. (2020), “*Análise da confiabilidade dos mecanismos de autorregeneração do concreto em ambientes agressivos de exposição*”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, p. 348.
- Patel, P. (2015), *Helping Concrete Heal Itself*. ACS Central Science. 1(9):470-472.
- Pelletier, M. M., Brown, R., Sshukla, A., Bose, A. (2011), *Selfhealing concrete with a microencapsulated healing agent*. University of Rhode Island, Kingston, RI, USA.
- Rais, M. S., Khan, R. A. (2021), *Experimental investigation on the strength and durability properties of bacterial self-healing recycled aggregate concrete with mineral admixtures*. Construction and Building Materials. Vol 306, Nov 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124901>
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S. (2001), *Remediation of concrete using microorganisms*, ACI Mater. J. 98(1).
- Schwantes-Cezario, N., Nogueira, G. S. F., Toralles, B. M. (2017), *Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de B. subtilis AP91*. Revista de Engenharia Civil IMED. 4(2):142-158, <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2017.v4i2.2072>
- Seifan, M., Samani, A. K. and Berenjian, A. (2016), *Bioconcrete: next generation of selfhealing concrete*, Applied Microbiology and Biotechnology. 100:2591-2602, <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Fraaij, A. (2011), *Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a selfhealing agent in blast furnace slag mortar*. Heron. 56(1-2):17-36.
- Souradeep, G., Kua, H. W. (2016), *Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering. 25:864-870, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001687)
- Stanaszek-Tomal, E. (2020), *Bacterial Concrete as a Sustainable Building Material?* 2020. Sustainability, 12, 696; <http://doi:10.3390/su12020696>
- Tittelboom, K. V., De Belie, N. (2013), *Self-Healing in Cementitious Materials - A Review*. Materials. 6:2182-2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
- Van Breugel, K. (2007). “*Is there a market for self-healing cement-based materials?*” in: First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee (Netherlands), pp. 1-9.
- Xu et al. (2020), *Application of ureolysis-based microbial CaCO₃ precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion*. Construction and Building Materials, Vol 265, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120364>
- Wan, P, et al. (2021), *Self-healing properties of asphalt concrete containing responsive calcium alginate/nano-Fe₃O₄ composite capsules via microwave irradiation*. Construction and Building Materials, Vol 310, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125258>
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Vlierbergue, S. V., Verstraete, W., De Belie, N. (2014), *X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete*. Cement and Concrete Composites. 53:289-304, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.014>
- Wang, J. et al. (2017), *Bacillus sphaericus LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete*. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 101, n. 12, p. 5101–5114, <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8260-2>
- Yang, J., Jiang, G. (2003), *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*, Cement and Concrete Research. 33:381-386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)
- Zhang, X et al. (2021), *Effects of carrier on the performance of bacteria-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials, Vol 305, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124771>

Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação

R. Costa^{1*} , A. Franchetto¹ , A. Gouveia¹ , F. Ziegler¹ , K. Pessoa¹ , M. Garcez¹ 

* Autor de Contato: rayarapintocosta@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

Recepção: 14/09/2021 | Aceitação: 02/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este artigo busca avaliar a variabilidade na previsão da vida útil de estruturas de concreto através de quatro modelos que estimam o avanço natural da frente de carbonatação. Os resultados mostram que há variabilidade na frente de carbonatação estimada. Os modelos de Possan (2010) e Eklou (2018) apresentam valores estimados próximos aos medidos, enquanto Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) tendem, respectivamente, a subestimar e superestimar a frente natural de carbonatação. Somente concretos sem adição de materiais cimentícios suplementares foram considerados, por limitações dos modelos. A resistência à compressão, concentração de CO₂ e umidade relativa do ar têm influência significativa nos resultados e a variabilidade depende de quais parâmetros são considerados nos modelos.

Palavras-chave: carbonatação; previsão de vida útil; frente de carbonatação; durabilidade do concreto.

Citar como: Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M. (2022), "Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 47 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

¹ Núcleo orientado para a inovação da construção (NORIE), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez contribuíram com a concepção da ideia e metodologia do estudo com 16,66% de participação cada. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa participaram da investigação e análise formal dos resultados com 20% de participação cada. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez forneceram contribuições ao manuscrito na discussão dos resultados com participação de 16,66% cada.

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Service life prediction for concrete structures based on carbonation front depth models

ABSTRACT

This paper seeks to evaluate the variability in predicting the service life of concrete structures through four models that estimate the natural advance of the carbonation front. The results show that there is variability in the estimated carbonation front. The models by Possan (2010) and Ekolu (2018) show estimated values close to measured ones, while Ho and Lewis (1987) and Bob and Affana (1993) tend to underestimate and overestimate the natural carbonation front, respectively. Only concretes without added supplementary cementitious materials were considered, due to model limitations. Compressive strength, CO₂ concentration and relative humidity have significant influence on the results and the variability depends on which parameters are considered in the models.

Keywords: carbonatation; service life prediction; carbonatation depth; concrete durability.

Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón a partir de modelos que estiman el avance del frente de carbonatación

RESUMEN

Este artículo avalúa la variabilidad en la previsión de la vida útil de estructuras de hormigón a través de cuatro modelos que estiman el avance natural del frente de carbonatación. Los resultados muestran que hay variabilidad en el frente de carbonatación estimado. Los modelos Possan (2010) y Ekolu (2018) presentan valores estimados cercanos a los medidos, mientras que Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) subestiman y sobreestiman el frente de carbonatación natural. Sólo se consideraron los hormigones sin adición de materiales cementantes suplementarios, debido las limitaciones del modelo. La resistencia a compresión, concentración de CO₂ y humedad relativa tienen influencia significativa en los resultados y la variabilidad depende de los parámetros que se consideren en los modelos.

Palabras clave: carbonatación; predicción de vida útil; profundidad de carbonatación; durabilidad del hormigón.

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 carbonatação é um fenômeno gerado pela interação do concreto com o ambiente. Ela acontece quando há a reação do dióxido de carbono (CO_2) do ar com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), produto de hidratação do cimento, e que propicia a alta alcalinidade na solução intersticial do concreto, formando carbonato de cálcio (CaCO_3). O cimento Portland hidratado presente no concreto tem pH alcalino (12-13), devido principalmente ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Entretanto, com a formação de CaCO_3 ocorre a redução desse pH para valores como 9,4, que à temperatura ambiente propicia a precipitação de CaCO_3 . Então, essa acidificação da matriz cimentícia causa a despassivação da armadura, deixando a mesma susceptível a processos corrosivos. A corrosão é a principal manifestação patológica em estruturas de concreto armado (Peter *et. al.*, 2008; Chen, 2019).

Os principais fatores que afetam a carbonatação e sua velocidade são: temperatura, umidade relativa do ambiente (UR), concentração de CO_2 , revestimento da superfície, fator a/c, tipo de cimento utilizado, teor de cimento e de água empregado, condições de cura e o grau de hidratação da matriz, permeabilidade do concreto e rede de poros (Ribeiro *et. al.*, 2018; Li *et. al.*, 2018; Song; Kwon, 2007; Houst; Wittmann, 2002). Em idades iniciais (até os 28 dias, geralmente) a carbonatação tem baixa ocorrência. Todavia, com um maior tempo de exposição ao ambiente saturado com CO_2 a carbonatação fica mais evidente, podendo se manifestar em grande parte da estrutura de concreto (Ribeiro *et. al.*, 2018).

Conforme a NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1 (ABNT, 2013), Vida Útil (VU) é o período em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, atendendo aos níveis de desempenho estabelecidos nesta norma. Para a determinação da VU de estruturas de concreto carbonatadas, procede-se a aplicação de modelos baseados em equações matemáticas para mensurar a profundidade de carbonatação e assim, descobrir a velocidade que essa frente de carbonatação avança para o interior da estrutura (Possan, 2010).

Os modelos que estimam a profundidade de carbonatação pressupõem que o concreto é homogêneo. Na prática isso não ocorre, pois sua consistência depende do tempo de adensamento e cura, além das condições de umidade relativa (UR) do ambiente. Esse pressuposto garante que as propriedades determinantes da taxa de carbonatação são semelhantes em todas as profundidades do concreto, o que simplifica os cálculos (Köliö *et. al.*, 2014).

Não há um modelo que represente fielmente o comportamento da carbonatação no concreto e isso se deve aos diversos fatores explicitados anteriormente. Portanto, a escolha sobre qual modelo aplicar depende das características do objeto de estudo e das variáveis do modelo.

Neste sentido, este trabalho analisa a variabilidade na previsão da VU através de quatro modelos que estimam a profundidade de carbonatação. O estudo é realizado com base em banco de dados de ensaios realizados sob condições naturais de envelhecimento e exposição encontrados na literatura. Uma análise de sensibilidade foi aplicada para identificação dos parâmetros que mais influenciam nas variações encontradas entre os valores estimados pelos modelos e obtidos experimentalmente. Esse estudo busca sobretudo contribuir com a comunidade técnico-científica na temática de manifestações patológicas, especialmente na definição de modelos que consigam melhor estimar o avanço da frente de carbonatação, auxiliando nas tomadas de decisão relativas à durabilidade e à vida útil das estruturas de concreto armado na etapa de projeto.

2. MÉTODO

O método utilizado se divide em: *i)* Triagem de modelos matemáticos da literatura para prever a profundidade de carbonatação em concretos; *ii)* Criação de um banco de dados de concreto a partir de trabalhos da literatura; *iii)* Análise comparativa dos modelos *iv)* Análise de sensibilidade para

entender as respostas dos modelos de previsão da profundidade de carbonatação, de acordo com as variáveis que cada modelo considera.

2.1 Modelos de estimativa da profundidade de carbonatação

2.1.1 Modelo de Possan (2010)

O modelo proposto por Possan (2010), considera fatores que influenciam a carbonatação, além de ter dados de entrada de fácil obtenção conforme em (1). A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “y” (mm); k_c é um fator variável de acordo com o tipo de cimento (Tabela 1); f_c é a resistência média à compressão (MPa); k_{fc} é o fator variável à resistência à compressão axial do concreto (Tabela 1); t é a idade (anos); ad é o teor de adição pozolânica (% em relação a massa de cimento); k_{ad} é fator variável referente às adições pozolânicas do concreto (Tabela 1); CO_2 é o teor de CO_2 da atmosfera (%); k_{CO_2} é fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente (Tabela 1); UR é a média do ambiente (%*0,01); k_{ur} é o fator variável referente à UR (Tabela 1) e; k_{ce} é o fator variável referente à exposição à chuva (Tabela 2).

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (1)$$

Tabela 1. Coeficientes do modelo Possan (2010) por tipo de cimento.

Tipos de cimento	Características do concreto			Características do ambiente	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	(k_c)	(k_{fc})	(k_{ad})	(k_{CO_2})	(k_{ur})
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Fonte: Possan, 2010.

Tabela 2. Coeficientes do modelo Possan (2010) em função das condições de exposição.

Tipo de exposição	k_{ce}
Ambiente interno protegido da chuva	1,3
Ambiente externo protegido da chuva	1
Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

Fonte: Possan, 2010.

2.1.2 Modelo de Eklou (2018)

O modelo matemático proposto por Eklou (2018) considera diversos parâmetros relacionados à carbonatação, como UR e temperatura do ambiente, concentração de CO_2 , proteção da estrutura e incidência das chuvas, e estima a profundidade de carbonatação a partir de cinco equações aplicadas em sequência. A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “y” (mm); e_h é o coeficiente relacional referente à UR; e_s o coeficiente relacional referente à resistência à compressão do concreto; e_{co} o coeficiente relacional referente à concentração de CO_2 no ambiente; $F_{c(t)}$ a função de crescimento da resistência do concreto; t o tempo de exposição do concreto (anos); g o fator dependente do tipo de cimento e; RH a UR média do ambiente (%).

$$y = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot 1000 \cdot F_{c(t)}^g \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$e_h = 16 \cdot \left(\frac{RH-35}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^{1,5} \rightarrow 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (3)$$

$$e_s = \begin{cases} 1,0 \rightarrow \text{Exposição externa protegida} \\ f_{c28}^{-0,2} \rightarrow \text{Exposição externa desprotegida} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha f_{c28}^r \rightarrow 20 < f_c < 60 \text{ MPa} \\ 1,0 \rightarrow f_c > 60 \text{ MPa} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{c(t)} = \frac{t}{a+bt} \cdot f_c \rightarrow f_c = f_{c28} \text{ ou } f_{cbn} \quad (6)$$

Para encontrar o " e_{co} ", utiliza-se (5), inserindo, caso necessário, a resistência à compressão do concreto aos 28 dias de cura (f_{c28}) e os respectivos coeficientes de correção " α " e " r " da Tabela 3. $F_{c(t)}$ é obtido através da (6), sendo que seus coeficientes " a " e " b " (Tabela 4) dependem dos valores de resistência do concreto considerados (f_{c28} , ao se considerar resistência do concreto aos 28 dias e f_{cbn} , ao se considerar a resistência do concreto a longo prazo), bem como as idades do concreto considerado. Os coeficientes " g " aplicados na (2) devem ser consultados na Tabela 5.

Tabela 3. Coeficientes de Eklou (2018) para a equação de e_{co} .

Coeficientes	Concentração de CO ₂ da atmosfera (ppm)				
	200	300	500	1000	2000
α	1,40	1,00	2,50	4,50	14,00
r	-0,25	0,00	-0,25	-0,40	-0,67

Fonte: Eklou, 2018.

Tabela 4. Coeficientes de Eklou (2018) para a equação de $F_{c(t)}$.

Resistência à compressão	Idade do concreto	a	b
f_{c28}	$t < 6$ anos	0,35	$0,6 - t^{0,5}/50$
	$t > 6$ anos	$0,15t$	$0,5 - t^{0,5}/50$
f_{cbn}	$t < 15$ anos	0,35	$1,15 - t^{0,6}/50$
	$t > 15$ anos	$0,15t$	$0,95 - t^{0,6}/50$

Fonte: Eklou, 2018.

Tabela 5. Coeficientes de Eklou (2018) para a equação de g .

Materiais cimentícios suplementares (MSC)	Tipos de cimento*	Fator de condutância “g”
20% MSC	CEM I, CEM II/A	-1,5
30% cinza volante	CEM II/B, CEM IV/A	-1,4
50% escória	CEM III/A	
*Conforme norma britânica BS EN 197-1		

Fonte: Eklou, 2018.

2.1.3 Modelo de Ho e Lewis (1987)

O modelo de Ho e Lewis (1987) é um aprimoramento do modelo proposto por Tuutti (1982), sendo adicionada na equação um parâmetro para a carbonatação inicial, conforme observado na Equação

8. A profundidade carbonatada é representada pelo fator e_c (mm); e_0 a profundidade de carbonatação inicial (mm); k o coeficiente de carbonatação ($\text{mm/ano}^{0,5}$); t o tempo (anos).

$$e_c = e_0 + k\sqrt{t} \quad (7)$$

O modelo proposto por Ho e Lewis (1987) não informa como determinar o coeficiente de carbonatação (k). Dessa forma, diferentes propostas foram desenvolvidas para a determinação desse coeficiente, como o modelo proposto por Helene (1997), que leva em consideração o tipo de cimento utilizado, a concentração de CO_2 do ambiente e a resistência à compressão do concreto Equações (8) - (10). O coeficiente de carbonatação é representado pelo fator k ($\text{mm/ano}^{0,5}$); fck a resistência à compressão (MPa) e; CCO_2 a concentração de CO_2 (%).

Concretos em geral (Equação 9):

$$k = (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{\text{CCO}_2} \quad (8)$$

Concretos com cimento pozolânico (Equação 10):

$$k = 1,1 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{\text{CCO}_2} \quad (9)$$

Concretos com cimento de alto forno (Equação 11):

$$k = 1,2 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{\text{CCO}_2} \quad (10)$$

2.1.4 Modelo de Bob e Affana (1993)

O modelo de Bob e Affana (1993) também se baseia no modelo desenvolvido por Tuutti (1982), porém os autores perceberam que a profundidade de carbonatação do concreto estava relacionada a mais fatores, como a UR do ar, o tipo de cimento e a resistência à compressão do concreto. O modelo é apresentado na Equação (11). A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “ y ” (mm); c é o coeficiente do tipo de cimento (Tabela 6); k o coeficiente dependente da UR do ar (Tabela 6); fc a resistência à compressão do concreto (MPa); t o tempo (anos) e; d o coeficiente referente a quantidade de CO_2 (Tabela 6).

$$y = 150 \cdot \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{fc} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

Tabela 6. Coeficientes k , d e c do modelo.

Umidade relativa	k
$\text{UR} \leq 60$	1,0
$70 \leq \text{UR} \leq 75$	0,7
$80 \leq \text{UR} \leq 85$	0,5
$\text{UR} \geq 90$	0,3
Quantidade de CO_2	d
$\text{CO}_2 \leq 0,03\%$	1,0
$0,03 < \text{CO}_2 \leq 0,1\%$	2,0
Tipo de cimento	c
Cimento Portland CP40 e CP45	0,8

Cimento Portland CP50 e CP55	1,0
Cimento Portland + 15% de adições minerais	1,2
Cimento Portland + 30% de adições minerais	1,4
Cimento Portland + 50% de adições minerais	2,0

Fonte: Bob e Affana, 1993.

2.2 Banco de dados

Para a criação do banco de dados realizou-se uma pesquisa bibliográfica na literatura nacional e internacional. A partir destes trabalhos, que avaliaram diferentes traços de concreto sob os efeitos da carbonatação natural, foram selecionados um total de 300 dados. Posteriormente, com esse grupo de dados, foi efetuada uma nova triagem para selecionar os dados que efetivamente poderiam ser utilizados nos modelos matemáticos de carbonatação utilizados neste trabalho, citados no item 3.1. Desses dados de diferentes concretos, utilizaram-se 24 para o desenvolvimento do presente trabalho, apresentados na Tabela 7 onde o termo TE corresponde ao tempo de exposição e ec à profundidade carbonatada.

Tabela 7. Base de dados.

Dados	TE (anos)	a/c	Cimento	fck 28 (MPa)	CO ₂ (%)	UR (%)	Exposição	ec (mm)
Possan (2010)	7,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepc	12,01
	12,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepc	15,1
Pauletti (2009)	2,50	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedc	1,31
	4,83	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedc	2,00
Tasca (2012)	2,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	0,92
	4,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	1,41
	14,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	6,35
Nardino et al. (2018)	3,33	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	6,00
	6,41	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	8,10
	7,80	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	7,44
Rozière et al. (2009)	1,00	0,63	CP V*	47,80	0,053	0,50	aedc*	1,20
	1,00	0,63	CP V*	36,20	0,053	0,50	aedc*	10,90
Ribeiro et al. (2018)	10,00	0,65	CP V	32,30	0,015	0,55	aedc	11,90
	10,00	0,44	CP II F	54,20	0,015	0,55	aedc	3,00
Sanjuan et al. (2003)	2,00	0,69	CP V	17,00	0,030	0,50	aipc	7,00
	2,00	0,49	CP V	28,00	0,030	0,50	aipc	5,00
Ferreira (2013)	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aedc	7,56
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	12,86
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	13,89
	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	13,57
	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	10,00
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	15,36
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	16,80
	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	15,96
UR - umidade relativa; aepc - ambiente externo protegido da chuva; aedc - ambiente externo desprotegido da chuva; aipc - ambiente interno protegido da chuva; TE – tempo de exposição, ec – profundidade carbonatada; * - dado estimado..								

2.3 Comparação dos modelos e análise de sensibilidade

Foi realizada uma comparação da profundidade de carbonatação real (mm), em relação à profundidade de carbonatação estimada, e quantificou-se o erro (mm e %). Além disso, foi determinado o nível de sensibilidade dos modelos, levando em consideração três fatores: resistência à compressão (MPa); concentração de CO₂ no ambiente (%); UR do ambiente (%). A partir desses critérios, foi feita uma simulação de cenários de carbonatação natural, onde os fatores variaram em teor, enquanto outras variáveis permaneceram fixas. Os fatores estipulados para os cenários foram definidos com base nas informações obtidas pelo banco de dados. As profundidades de carbonatação foram delimitadas por um período de 50 anos. Tendo esses fatores em vista, foram determinados três cenários, que estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Descrição dos cenários A, B e C.

Cenário A – varia resistência à compressão aos 28 dias				
Resistência à compressão (MPa)	40			20
Umidade relativa (%)	65			65
Dióxido de carbono (%)	0,035			0,035
Tipo de ambiente	Interno			Interno
Tipo de cimento	CP V			CP V
Cenário B – varia dióxido de carbono do meio ambiente				
Resistência à compressão (MPa)	40			40
Umidade relativa (%)	65			65
Dióxido de carbono (%)	0,03			0,07
Tipo de ambiente	Interno			Interno
Tipo de cimento	CP V			CP V
Cenário C – varia umidade relativa do meio ambiente				
Resistência à compressão (MPa)	40	40	40	40
Umidade relativa (%)	30	50	70	90
Dióxido de carbono (%)	0,035	0,035	0,035	0,035
Tipo de ambiente	Interno	Interno	interno	Interno
Tipo de cimento	CP V	CP V	CP V	CP V

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 1 (a) mostra que há uma tendência dos modelos gerarem resultados diferentes dos observados nos experimentos. Essas observações são mais explícitas para o modelo de Bob e Affana (1993) que superestimou, e o modelo de Ho e Lewis (1987) que subestimou as profundidades de carbonatação.

Os dados apresentados na Figura 1 (b) permitem comparar as profundidades estimadas por cada modelo, em relação às profundidades reais medidas.

A reta vermelha tracejada representa resultados iguais para os valores estimados e obtidos experimentalmente: os pontos acima da linha representam valores que foram superestimados pelo modelo, enquanto valores sob a linha representam estimativas subestimadas para a profundidade de carbonatação.

É possível perceber que o modelo de Ho e Lewis (1987) resulta em valores que subestimam de maneira mais evidente as profundidades, e que o modelo de Bob e Affana (1993) as superestimam. Os modelos de Possan (2010) e Ekolu (2018), por outro lado, aproximam-se da linha tracejada, uma vez que os valores estimados são mais condizentes com os obtidos nos experimentos, e

subestimam a profundidade de carbonatação.

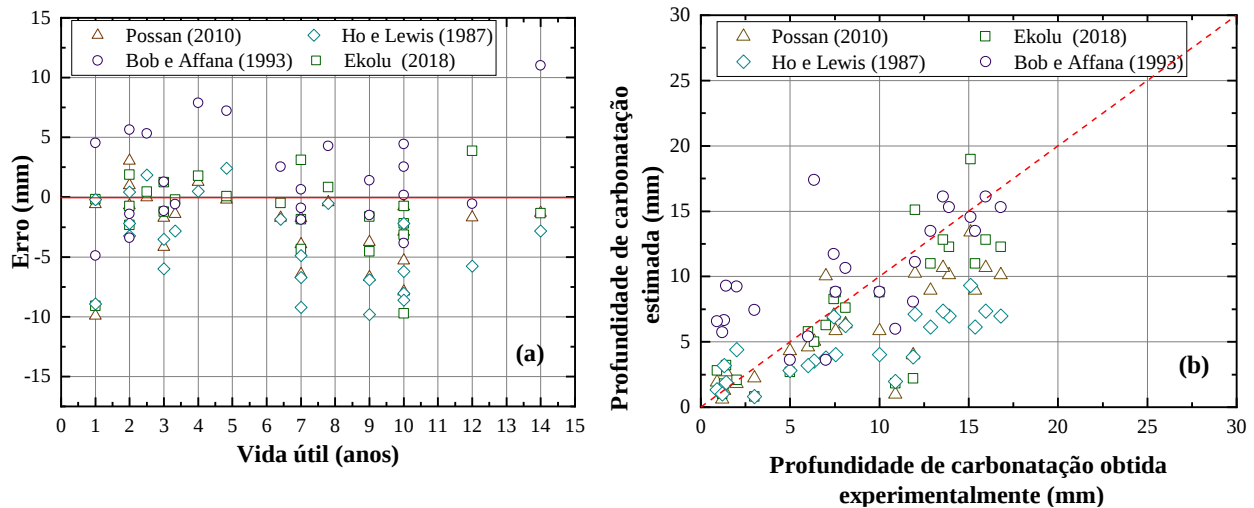


Figura 1. Erros para as profundidades de carbonatação em função do tempo (a) e comparativo entre a profundidade de carbonatação estimada e obtida experimentalmente (b).

A Figura 2 (a) contém os resultados da análise de sensibilidade dos modelos quanto à resistência à compressão, considerando valores de 20 e 40 MPa no processo de carbonatação natural durante o período de 50 anos. Nessa figura são apresentadas as profundidades de carbonatação e o tempo de VU (vida útil), sendo indicado o cobrimento mínimo de 25 mm estipulado pela NBR 6118 (2014) para estruturas em ambiente urbano (classe de agressividade II, moderada).

Em todos os modelos do cenário A, o crescimento da resistência à compressão do concreto resulta em menores profundidades de carbonatação. Esse comportamento está condizente ao previsto em literatura, visto que menores relações a/c estão diretamente ligadas à redução da porosidade da matriz, o que reduz a profundidade de carbonatação e é fator determinante da resistência do concreto (Tuutti, 1982; Ho e Lewis, 1987; Kulakowski, 2002).

A redução na profundidade de carbonatação ocasionada pelo aumento da resistência à compressão dos concretos de 20 para 40 MPa, considerando resultados para o mesmo período de tempo, é de aproximadamente 68,55%, 70,3%, 49,97% e 50% para os modelos de Possan (2010), Ekelu (2018), Ho e Lewis (1987), Bob e Affana (1993), respectivamente, esses valores são obtidos ao se fixar as variáveis das fórmulas de cada método variando-se apenas a resistência à compressão. Isso mostra que o fator resistência à compressão exerce maior influência nas profundidades de carbonatação estimadas pelos modelos de Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993). Além disso, os modelos Possan (2010) e Bob e Affana (1993) preveem que o concreto de 20 MPa não conseguiria atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário A. Já para os outros modelos, o concreto de 20 MPa já atenderia a esse requisito.

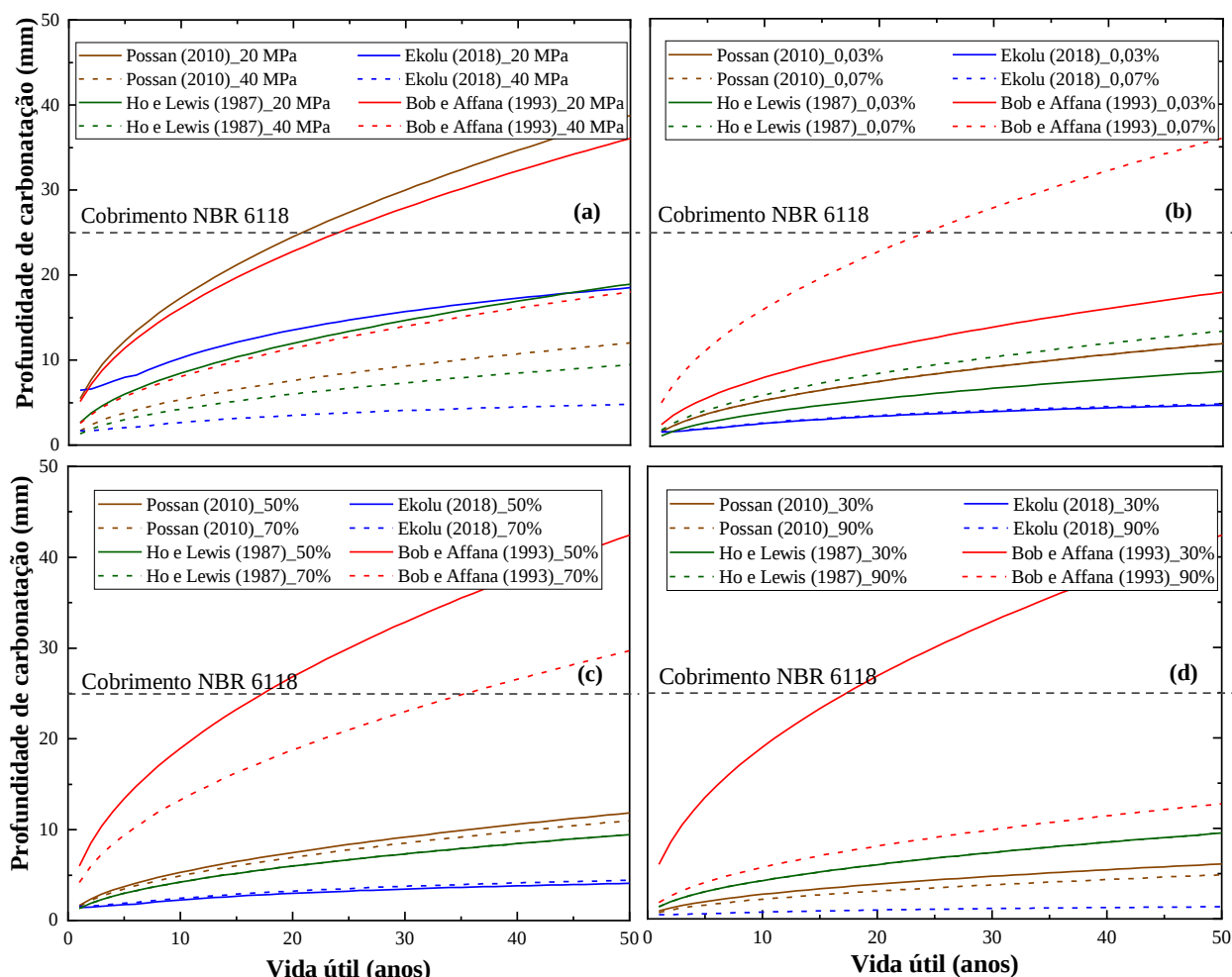


Figura 2. Tempo de vida útil e profundidade de carbonatação em relação a resistência à compressão – Cenário A – (a), dióxido de carbono no meio ambiente - Cenário B – (b), umidade relativa de 50 e 70% - Cenário C – (c) e umidade relativa de 30 e 90% - Cenário C - (d).

A Figura 2 (b) mostra a sensibilidade dos modelos quanto ao teor de CO_2 presente no ambiente. Os teores de CO_2 foram delimitados com base nos valores obtidos no banco de dados e definições apresentadas no trabalho de Possan (2010). Estipulou-se, então, concentrações de 0,03% e 0,07% no processo de carbonatação natural durante o período de 50 anos. Pires (2016) apresenta a concentração de CO_2 como um dos fatores intervenientes no processo de carbonatação do concreto, e Cadore (2008) sugere que a velocidade de penetração da frente de carbonatação tem relação direta com a concentração de CO_2 no ambiente, ou seja, eleva-se a velocidade de carbonatação com o aumento da concentração de CO_2 .

Nota-se na Figura 2 (b) que embora a carbonatação cresça com a elevação dos teores de CO_2 , nos modelos de Possan (2010) e Ho e Lewis (1987), esse crescimento é menor. O aumento da profundidade de carbonatação ocasionada pelo crescimento do teor de CO_2 do ambiente considerando as médias das mesmas é de aproximadamente 0,17%, 2,89%, 53,84% e 100% para os modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho e Lewis (1987), Bob e Affana (1993), respectivamente. Esse resultado indica que o fator CO_2 do modelo Possan (2010) e Ekolu (2018) exercem menor influência nas profundidades de carbonatação estimadas para o Cenário B, comparativamente aos outros modelos mencionados. O modelo de Bob e Affana (1993) sugere que em ambientes com 0,07% de CO_2 , o concreto não conseguiria atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário B.

A Figura 2 (c) ilustra a sensibilidade ao teor de UR do ambiente no processo de carbonatação natural para um período de 50 anos. As UR selecionadas são valores extremos encontrados na literatura para os processos de carbonatação natural (Pauletti, 2009; Tasca, 2012; Rozière, 2009; Nardino, 2019).

No cenário C, verifica-se que o crescimento da UR do ambiente resulta na redução da profundidade de carbonatação para o modelo de Possan (2010) e Bob e Affana (1993). Entretanto, enquanto o modelo de Possan (2010) tem uma diminuição de 7,16% em termos de média, Bob e Affana (1993) tem uma redução de 30%. Isso sugere que o método de Bob e Affana (1993) tem uma sensibilidade maior a esta variável. No modelo de Ekolu (2018) há o crescimento da profundidade de carbonatação em 8,44% considerando as médias. No modelo de Ho e Lewis (1987), por outro lado, os valores de carbonatação permanecem inalterados com o incremento de 20% na UR. Isto é explicado devido ao modelo de Ho e Lewis (1987) não possuir entrada de dados para UR, sendo a equação portanto, insensível a este fator.

A UR do ambiente é fator relevante para o processo de carbonatação e deve ser contabilizada direta ou indiretamente nos modelos de previsão de VU por carbonatação natural. Nesse fenômeno, a água presente nos poros é responsável por dissolver o CO_2 , formando o ácido carbônico (H_2CO_3) e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produto da hidratação do cimento. O resultado é a formação de CaCO_3 (Pauletti, 2009). O volume e composição da água dos poros são influenciados por fatores como a relação a/c, tempo de cura, temperatura e, inclusive, a UR do ambiente, fator aqui avaliado (Vieira et al., 2016).

A literatura indica ainda que ambientes com excesso ou baixa UR não são propícios para o processo de carbonatação natural. Na primeira situação, os poros do concreto ficariam preenchidos com água, dificultando a penetração do CO_2 para formar H_2CO_3 . Por outro lado, em condições de baixa UR, a água nos poros do concreto seria insuficiente para gerar taxas de carbonatação natural mais aceleradas, uma vez que é necessário água para gerar H_2CO_3 (Félix et al., 2017; Possan et al., 2017; Elsalamawy et al., 2019; Dierfeld et al., 2020).

Considerando o Cenário C, os resultados de Possan (2010) e Bob e Affana (1993) mostraram uma redução nas profundidades de carbonatação devido ao crescimento da UR de 50 para 70%, o que sugere que nesses modelos a saturação dos poros é prevista nessas faixas de UR do ambiente. Em contraste, os resultados obtidos por Ekolu (2018), sugerem que esses teores de UR são propícios ao processo de carbonatação. Nesse sentido, Chen et al., (2018) observaram um aumento da profundidade de carbonatação com um aumento da UR do ambiente, com um pico de cerca de 70%. Os dados adquiridos pelo método Ekolu (2018) no Cenário C seguem o sugerido por esses autores.

Para a melhor compreensão desses comportamentos, os modelos Possan (2010), Ekolu (2018) e Bob e Affana (1993) foram também testados no Cenário C, considerando 30% e 90% de UR. Os resultados constam na Figura 2 (d). Para o método de Possan (2010), são obtidas profundidades de carbonatação inferiores em faixas de UR de 30% e 90% comparativamente a teores de 50% e 70%. Enquanto as médias de profundidades de carbonatação em 50 anos para 50% e 70% de UR são 8,01 mm e 7,43 mm, respectivamente, para 30% e 90% de UR são 4,10 mm e 3,28 mm respectivamente. Isso indica que o modelo é sensível a condições de excesso e baixa UR.

Ainda, no modelo de Ekolu (2018), o teor de 30% gera valores negativos, enquanto que 90% prevê resultados significativamente inferiores ao de 50% e 70%. Sugere-se assim que esse modelo reconheça a faixa de UR de 50 e 70% como mais propícia para o processo de carbonatação. Já para o modelo Bob e Affana (1993), a UR de 30% resulta em profundidade de carbonatação igual à condição de 50%. Isso ocorre porque o modelo de Bob e Affana (1993) não tem como dado de entrada a UR, mas sim coeficientes determinados com base em faixas de UR. Assim sendo, o mesmo coeficiente (1,0) é utilizado para UR iguais ou inferiores a 60%, logo, o modelo não é sensível a UR inferiores a este valor. O mesmo acontece com valores iguais ou superiores a 90%, onde adota-se o coeficiente 0,3. Entretanto, o modelo considera que para $\text{UR} \leq 60\%$ a profundidade

de carbonatação é superior à condição com $UR \geq 90\%$. Para 30% obteve-se uma média de profundidade de carbonatação ao longo de 50 anos de 28,68 mm, enquanto para 90% encontrou-se 8,6 mm. A Figura 2 (c) indica ainda que segundo o modelo de Bob e Affana (1993), concretos em ambientes com 50 e 70% de UR não conseguiriam atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário C. Além disso, de acordo com o modelo de Bob e Affana (1993), o concreto no ambiente com 30% UR, e condições como no Cenário C, Figura 2 (d), não atenderiam a uma VU de 50 anos para um cobrimento de 25mm.

4. CONCLUSÕES

As principais considerações que podem ser tomadas com base nos resultados discutidos neste artigo são:

- Os modelos matemáticos de Possan (2010) e Eklou (2018) resultam em profundidades de carbonatação mais próximas às encontradas nos ensaios;
- O modelo de Ho e Lewis (1987) tende a subestimar a profundidade de carbonatação;
- O modelo de Bob e Affana (1993) tende a superestimar a profundidade de carbonatação;
- Os modelos Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) mostraram maior influência do fator resistência à compressão nas profundidades de carbonatação;
- O fator concentração de CO_2 dos modelos Possan (2010) e Eklou (2018) exercem a menor influência nas profundidades de carbonatação estimadas para o Cenário B comparativamente aos outros modelos mencionados;
- O modelo de Bob e Affana (1993) tem a maior sensibilidade à variável UR. Enquanto o modelo Ho e Lewis (1987) não possui entrada de dados para essa variável.

O modelo de Possan (2010) e Bob e Affana (1993) com concreto de 20 MPa no Cenário A, modelo Bob e Affana (1993) com concreto exposto a 0,07% CO_2 no ambiente no Cenário B, e modelo Bob e Affana (1993) com concreto exposto em ambiente de UR de 50% e 70% no Cenário C, não conseguiriam atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas. Também não atende a VU de 50 anos para um cobrimento de 25 mm, segundo o modelo Bob e Affana (1993), com concretos em ambientes com 30% UR, para o Cenário C.

Assim, nota-se que há variabilidade nos resultados de frente de carbonatação estimados pelos modelos selecionados comparativamente aos resultados reais de carbonatação natural. E essa variabilidade, se dá em maior ou menor grau dependendo dos parâmetros considerados nas equações. A análise de sensibilidade realizada com os três parâmetros avaliados, resistência à compressão, concentração de CO_2 e umidade relativa do ar, mostra que essas variáveis têm influência significativa nos resultados emitidos pelos modelos e, portanto, devem ser considerados nas equações.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), por fornecer os subsídios necessários para o desenvolvimento deste estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*

– *Procedimento. Rio de Janeiro.*

Bob, C., Afana, E. (1993). “On-site assessment of concrete carbonation”. Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Structures, RILEM, Bratislava: (Rep. Eslovaca), pp. 84–87.

Cadore, W.C. (2008), “Estudo da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p.149.

Chen, T., Gao, X. (2019), *Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste*. Journal of CO₂ Utilization, 34:74-86. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.034>

Chen, Y., Liu, L., Yu, Z. (2018), *Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength*. Materials, 11, 2167. <https://doi.org/10.3390/ma11112167>

Dierfeld, S. G. et al. (2020), *Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC*. Materials and Structures, 53:136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>

Elsalamawy, M., Mohamed, A. R., Kamal, E. M. (2019), *The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete*. Alexandria Engineering Journal 58(4):1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.008>

Ekolu, S. O. (2018), *Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation*. Cement and Concrete Composites. 86:40-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.006>

Ferreira, M. B. (2013), “Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, p. 197.

Félix, E. E., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), *Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*. Revista ALCONPAT, 7(3), pp. 302-316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>

Helene, P. (1997). “Vida útil das Estruturas de Concreto”. in: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais. Porto Alegre: RS (Brasil).

Ho, D. W. S., Lewis, R. K. (1987), *Carbonation of concrete and its prediction*. Cement and Concrete Research, 17(3):489-504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)

Housty, Y. F., Wittmann, F. H. (2012), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research, 32(12):1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)

Köliö, A. et al. (2014), *Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate*. Engineering structures, 62-63:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.032>

Kulakowski, M. P. (2002), “Contribuição ao estudo de carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS (Brasil), p. 180.

Li, D. et al. (2018), *Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures*. Construction and Building Materials, 167:73-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127>

Nardino, C. et al. (2019) “Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural” in: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Curitiba:PR (Brasil), pp. 300-311. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.052>

Pauletti, C. (2009). “Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre:RS (Brasil), p. 285.

- Peter, M. A. et al. (2008), *Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study*. Cement and concrete research, 38(12):1385-1393. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.003>
- Pires, P. F. (2016). “*Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. p. 141.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 263.
- Possan, E. et al. (2017), *CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study*. Case Studies in Construction Materials, 6:147-161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>
- Ribeiro, D. V. et. al. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, p. 426.
- Ribeiro, A. B., Santos, T., Gonçalves, A. (2018), *Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept*. Construction and Building Materials. 175:360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.206>
- Rozière, E., Loukili, A., Cussigh, F. (2009), *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*. Construction and Building Materials 23(1):190–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
- Sanjuán, M., Andrade, C., Cheyrez, M. (2003), *Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions*. Advances in Cement Research, 15(4):171–180. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.4.171>
- Song, H., Kwon, S. (2007), *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. Cement and Concrete Research, 37(6):909-915. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.011>
- Tasca, M. (2012), “*Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p. 178.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of Steel in Concrete*”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, p.468.
- Vieira, R. E. et al. (2016). “*Aspectos sobre a extração e composição da água de poro de pasta de cimento hidratado com vista à durabilidade do concreto armado*”. in: 7 Congresso Brasileiro de Cimento - CBCI, São Paulo: SP (Brasil), pp. 15.

Análise de desempenho de bloqueadores químicos por gravidade no tratamento de umidade ascendente em paredes de alvenaria

R. H. Malaquias¹, G. J. Bruschi^{2*}, D. S. Brisotto³

* Autor de Contato: gjo.bruschi@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.561>

Recepção: 13/10/2021 | Aceitação: 07/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise de desempenho do tratamento da umidade ascensional em paredes, através do uso de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrofugantes disponíveis no mercado brasileiro, com a introdução dos mesmos por gravidade. A avaliação da umidade ascendente deu-se pelo cálculo da taxa de absorção de água nos corpos de prova, aliado com as imagens obtidas pela câmera termográfica. A partir dos resultados encontrados concluiu-se que o tratamento não reduziu por completo a patologia nas paredes, porém ambos os produtos obtiveram um bom desempenho, conseguindo reduzir consideravelmente as taxas de absorção de água.

Palavras-chave: umidade ascensional; patologia; barreira química.

Citar como: Malaquias, R. H., Bruschi, G. J., Brisotto, D. S. (2022), “Análisis del rendimiento de bloqueadores químicos por gravedad en el tratamiento de la humedad ascendente en muros de mampostería”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 61 - 75, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.561>

¹ Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI Campus Erechim, Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Brasil.

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Contribuição de cada autor

Todos os autores contribuíram igualmente para a concepção e desenho do estudo. A preparação do material e a coleta de dados foram realizadas por Ronei. A análise dos dados foi realizada por Ronei (75%) e Giovani Jordi Bruschi (25%). O primeiro rascunho do manuscrito foi escrito por Giovani Jordi Bruschi e todos os autores comentaram as versões anteriores do manuscrito. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final. Além disso, a Dra. Daiane de Senna Brisotto foi responsável pela supervisão da pesquisa.

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Performance analysis of gravity chemical blockers in the treatment of rising damp in masonry walls

ABSTRACT

The objective of this work is the performance analysis of the rising damp treatment in walls, through the use of chemical blockers (i.e., crystallizing and water repellent) available in the Brazilian market, with their introduction by gravity. As there are no standardized tests for such a study, experiments conducted by other researchers were used as a reference. The evaluation of the rising damp was achieved by the calculation of the water absorption rate in the specimens, allied with the images obtained by the thermographic camera. From the results, it was concluded that the treatment did not completely reduce the pathological manifestation in the walls, but both products performed well and managed to reduce the water absorption rate considerably.

Keywords: rising damp; pathological manifestation; chemical barrier.

Análisis del rendimiento de bloqueadores químicos por gravedad en el tratamiento de la humedad ascendente en muros de mampostería

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el desempeño del tratamiento de la humedad ascendente en paredes, mediante el uso de bloqueadores químicos cristalizantes e hidrófugos disponibles en el mercado brasileño, con su introducción por gravedad. La evaluación de la humedad ascendente se realizó calculando la tasa de absorción de agua en las muestras, combinada con las imágenes obtenidas por la cámara termográfica. De los resultados encontrados se concluyó que el tratamiento no redujo por completo la patología en las paredes, sin embargo, ambos productos obtuvieron un buen desempeño, logrando reducir considerablemente las tasas de absorción de agua.

Palabras clave: humedad ascendente; patología; barreras químicas.

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 presença de umidade nas edificações é recorrente e pode gerar graves manifestações patológicas para o sistema construtivo. Materiais de construção porosos (e.g. tijolos e concreto) facilitam o transporte de gases e líquidos presentes no meio ambiente e, em combinação com outros fatores ambientais, podem levar a ataques biológicos, cristalização de sais, ataques químicos, danos por congelamento, etc. (Sandrolini e Franzoni 2006; Bertolini, 2010). O desenvolvimento dessas patologias pode ocorrer devido à má execução ou falta de sistema de impermeabilização, causando impacto estético e degradação das estruturas e revestimentos. Além disso, nos casos mais graves, problemas associados à saúde humana (Franzoni, 2018).

Como consequência da complexidade de seu tratamento, um dos tipos mais desafiadores de manifestação de umidade é a umidade ascensional. Reconhecido mundialmente, esse fenômeno se manifesta quando a água subterrânea flui para a base de uma construção e ascende pelos poros da estrutura por capilaridade (Massari e Massari, 1993; Alfano, 2005; Henriques, 2007). Embora ocorra com certa frequência, corresponde a um fenômeno complexo e com grande imprevisibilidade comportamental (Torres, 2014; Guimarães et al., 2016).

Diversas técnicas de reparo têm sido propostas para resolver este problema. As principais podem ser subdivididas em quatro grandes grupos de acordo com sua função (Henriques, 1994): (i) soluções para evitar o acesso de água do solo; (ii) soluções para remover o excesso de água; (iii) soluções para impedir o aumento da água; e (iv) soluções para ocultar anomalias. Quando bem adaptadas e executadas, as soluções para impedir o acesso de água do solo são a técnica de reparo mais eficiente no tratamento da umidade ascendente. Esta solução pode ser realizada reduzindo a seção absorvente, aumentando a ventilação de base ou através de barreiras físicas e químicas. Embora o sistema não atue como origem do fenômeno da ascensão capilar, impede que a água atinja alturas capilares excessivas (Torres, 2013; Freitas et al., 2008).

Atualmente, a implementação de barreiras químicas é um dos métodos mais amplamente utilizados para gerenciar e resolver o fenômeno da umidade ascensional. Essa técnica consiste em fazer furos na parede ao longo de um perfil horizontal, geralmente espaçados de 10 a 15 cm, o mais próximo possível do solo em um ou ambos os lados da alvenaria, dependendo principalmente da espessura da parede (Dreyer e Hecht, 2001; Alfano et al., 2006; Lubelli et al., 2013). Os aditivos químicos introduzidos nos orifícios podem funcionar preenchendo os poros (criando uma camada impermeável na alvenaria) e/ou tornando os poros repelentes de água (inibindo o transporte capilar). Dentre as substâncias de preenchimento de poros, também conhecidos como cristalizadores ou cobridores de poros, destacam-se as acrilamidas, resinas epóxi, silicatos alcalinos e silicatos inorgânicos. Quanto aos produtos hidrofugantes, os tipos mais difundidos são os organometálicos, siliconatos, silicones e siloxanos. Esses produtos podem ter um solvente orgânico ou ser soluções aquosas ou emulsões em água, sendo encontrados com diferentes viscosidades (líquido, creme e gel) (Lubelli et al., 2013; Socoloski e Masuero, 2019).

Um dos principais problemas associados à aplicação de barreiras químicas é a dificuldade de introdução do produto nos poros, uma vez que esses normalmente estão preenchidos com água. Para apresentar eficácia, o produto químico deve interagir com todos os poros e vazios, criando uma camada horizontal hidrofóbica ou impermeável que impede o acesso de água. Se a barreira horizontal não for contínua, a água ainda pode fluir e a umidade ascendente não será interrompida. Portanto, a introdução do produto, aplicada com pressão/injeção ou alimentação por gravidade/impregnação, deve ser realizada visando a estratificação das zonas tratadas (Hees et al., 2018).

A aplicação de barreiras químicas por gravidade (Figura 1 (a)) é baseada na força da gravidade e na capilaridade dos materiais e pode ser realizada inserindo os produtos químicos sem aparatos complexos (Torres, 2014). De acordo com a maioria dos fabricantes brasileiros, a perfuração deve

ser realizada com inclinação de 45° e os furos devem ser saturados antes da inserção dos produtos, promovendo uma melhoria na dispersão e consequentemente em todo o processo (Socoloski, 2015). A aplicação dos produtos químicos deve ser integral e contínua abrangendo toda a área tratada. O comportamento não intrusivo em conjunto com a versatilidade desta técnica resulta em um reconhecimento mundial de seu uso em edifícios históricos. Porém, para demonstrar sua eficiência, alguns anos podem ser necessários (Carrio, 1997). Na aplicação por injeção, conforme mostrado na Figura 1 (b), o fluido é bombeado na parede por pressão, por meio de uma bomba injetora com bicos especiais que evitam a retração dos produtos. Vários conjuntos de bocais podem ser acoplados simultaneamente à bomba injetora ou a injeção pode ser executada de forma independente (Luso, 2002). A pressão de injeção não é necessariamente constante e pode variar de aplicador para aplicador, mas não deve exceder 0,4 MPa. Essa faixa evita a possível degradação nos materiais constituintes das paredes tratadas (Henriques, 1994).

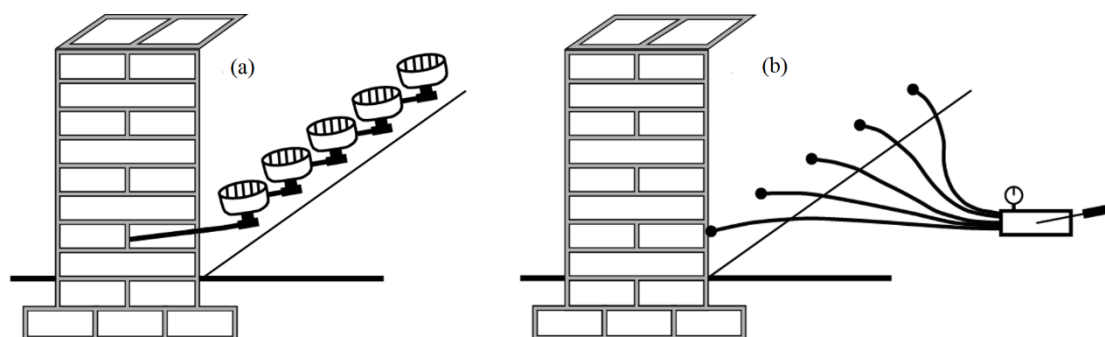


Figura 1. Introdução das barreiras químicas: (a) gravidade (b) injeção. Adaptado de Henriques (1994).

A utilização de barreiras químicas, seja por injeção ou por gravidade, tem sido amplamente investigada (Alfano et al., 2006; Freitas, 2014; Franzoni, 2014; Franzoni, 2018; Socoloski et al., 2019). As pesquisas foram realizadas em laboratório, em materiais de construção simples (Vanhellemon et al., 2008), conjuntos de materiais (Hacquebord et al., 2013) e *in-situ* (Larsen, 2012). Embora seja difícil comparar os resultados de diferentes pesquisas, considerando que os métodos experimentais geralmente não são convergentes, os estudos disponíveis fornecem uma indicação valiosa da capacidade de dispersão e eficiência de secagem dos produtos químicos (Franzoni et al., 2016). A capacidade de dispersão deve ser vista como um fator-chave para a criação de barreiras químicas funcionais e estáveis, visto que um comportamento não estacionário pode possibilitar o fluxo capilar (Hacquebord et al., 2013). Essa capacidade depende da natureza do solvente e de sua miscibilidade em água, bem como da viscosidade dos produtos químicos. Esses fatores são essenciais para o deslocamento da água dos poros (I'Anson e Hoff, 1988).

Apesar da existência de diversos métodos e produtos para resolver o problema da umidade ascensional, as pesquisas científicas sobre sua eficácia, tanto em laboratório quanto em campo, ainda são escassas. Além de não serem tão eficazes quanto o esperado, as soluções de tratamento podem agravar as manifestações patológicas se a tomada de decisão for inadequada. Assim, existe uma grande demanda por resultados experimentais que forneçam evidências sobre o funcionamento, eficácia e limitações desses sistemas de reparo, permitindo uma melhor compreensão do seu comportamento e, consequentemente, uma maior taxa de sucesso quando aplicados em alvenaria real.

Dentro deste contexto, esta pesquisa teve como objetivo estudar experimentalmente o tratamento de umidade ascensional em paredes com a utilização de barreiras químicas por gravidade, através de produtos bloqueadores com bases químicas distintas. Para tanto, foram analisados

comparativamente um produto cristalizante (silicato ativo) e um produto repelente de água (silano-siloxanos oligomérico).

2. MATERIAIS

Neste estudo, seis pequenas paredes foram construídas com a utilização de tijolos maciços cerâmicos e argamassa industrializada multiuso. As amostras foram submetidas ao procedimento de tratamento da umidade ascensional com dois produtos bloqueadores com bases químicas distintas.

2.1 Blocos cerâmicos

Foram adotados blocos cerâmicos sólidos de 190x90x50 mm (com tolerância de até 3 mm nas dimensões). Como não existe norma técnica para o ensaio de absorção de água em tijolos maciços, a NBR 15270 (ABNT, 2005) foi aplicada em substituição. Seis amostras foram preparadas seguindo cinco etapas: (i) remoção de partículas soltas e poeira; (ii) processo de secagem a 105°C durante 24 horas; (iii) pesagem para determinação do parâmetro de massa seca (d_m); (iv) imersão de cada amostra em água por 24 horas (em temperatura ambiente); e (v) nova pesagem para determinação do parâmetro de massa úmida (w_m). A taxa de absorção de água dos tijolos (WA) é determinada de acordo com (1) e os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 1. Solid ceramic bricks of 190 x 90 x 50 mm (with tolerances up to 3 mm in dimensions) were adopted.

$$WA(\%) = \frac{w_m - d_m}{d_m} \times 100 \quad (1)$$

Tabela 1. Taxa de absorção de água dos blocos cerâmicos

Propriedade	Amostra						Média (%)
	1	2	3	4	5	6	
Massa seca (g)	1605,48	1597,80	1587,41	1622,99	1586,27	1682,45	25,48
Massa úmida (g)	1994,56	2021,41	2017,26	2043,88	2012,05	2057,58	
WA (%)	24,23	26,51	27,08	25,93	26,84	23,30	

2.2 Argamassa industrializada

Para o assentamento dos tijolos foi utilizada uma argamassa industrializada multiuso. A argamassa multiuso industrializada foi escolhida devido ao melhor controle de qualidade do produto, evitando possíveis variações nos resultados. Este produto é composto por cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos, com resistência à compressão de 1,2 MPa e relação água/matéria seca de 0,2. A argamassa foi preparada com mistura de água até atingir os parâmetros adequados de consistência e homogeneidade. A consistência mínima (20 ± 5 cm) foi determinada seguindo a NBR 13276 (ABNT, 2005). Para a execução da base das paredes, foi utilizada uma argamassa com resistência de 8 MPa

2.3 Bloqueadores químicos

Inicialmente foi realizada uma pesquisa sobre os impermeabilizantes disponíveis para o tratamento da umidade ascensional na indústria brasileira. Apenas um produto de cada base química (um cristalizante e um repelente de água) foi escolhido para a pesquisa, devido à baixa disponibilidade

de repelentes de água para esse tipo de tratamento. O produto cristalizante, denominado produto A (65% de teor ativo), estava disponível comercialmente em embalagens de 1 litro e 25 litros. O hidrofugante, denominado produto B (9% de teor ativo), era oferecido apenas em embalagens de 18 litros. A caracterização dos bloqueadores químicos, fornecida pelos fabricantes, é apresentada na Tabela 2. O produto cristalizante foi caracterizado de acordo com seu pH e a taxa de sólidos enquanto o bloqueador químico repelente de água de acordo com seu pH e massa específica.

Tabela 2. Caracterização dos bloqueadores químicos

Produto	pH	Teor de ativos	Massa específica	Informações
Cristalizante (A)	11	65%	-	Silicato ativo
Hidrofugante (B)	6,5 to 8	9%	1 kg/m ³	Silano-siloxanos oligomérico

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Execução das amostras

Para simular uma parede real, miniparedes (50x50x9cm) foram moldadas de acordo com a metodologia apresentada por Socoloski (2015), que se baseou nos modelos de Rirsch e Zhang (2010) e Freitas et al. (2008). As dimensões adotadas foram as maiores possíveis considerando que deveriam ser carregadas por duas pessoas, não ultrapassando o limite de até 50 kg. Foram preparados seis corpos de prova, dois para a aplicação do produto cristalizante (PA1 e PA2), dois para o produto hidrofugante (PB1 e PB2) e dois como referência (T1 e T2) sem nenhum tratamento químico.

A base das paredes construídas tinha aproximadamente 50 milímetros de altura, executada em argamassa armada, com tela quadrada galvanizada de 250 milímetros para a prevenção de ruptura por cisalhamento. Barras de aço foram inseridas na base da argamassa, servindo como ganchos para o manuseio dos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 2 (a). Após o processo de cura de 21 dias, as paredes foram construídas sobre as bases. Os corpos-de-prova foram compostos por 2,5 tijolos por fileira, totalizando 8 fileiras, com juntas verticais intercaladas como em uma alvenaria real, conforme mostrado na Figura 2 (b). O contato da parede com a umidade do solo se dá através da fundação, feita de materiais cimentícios.



Figura 2. (a) Base da parede (b) Parede finalizada

3.2 Eficácia dos bloqueadores químicos

3.2.1 Taxa de absorção de água

Este teste forneceu o parâmetro principal na análise de desempenho do tratamento contra a umidade

ascendente. Os procedimentos foram baseados na pesquisa desenvolvida por Socoloski (2015), de acordo com as seguintes fases:

- a) Medição da massa de todos os corpos-de-prova (massa seca antes do tratamento), 21 dias após sua execução;
- b) Saturação das bases da argamassa (Figura 3);

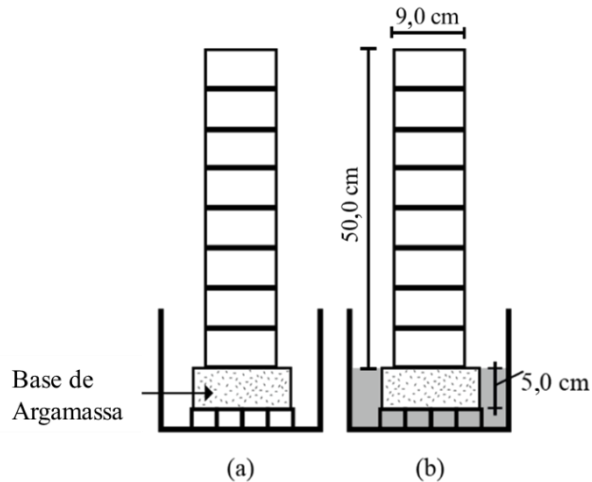


Figura 3. Saturação da base: (a) parede seca; (b) base em contato com a água. Adaptado de Socoloski (2015).

- c) Verificação da estabilização da massa das paredes, ocorrida entre os dias 7 e 8, indicando a estabilização da absorção de água. Medição da massa das paredes no dia 8 (massa úmida antes do tratamento);
- d) Cálculo da taxa de absorção de água antes do tratamento, com os valores de massa obtidos antes e após a saturação das bases;
- e) Tratamento das paredes com bloqueadores químicos, inseridos a 45°, com furos de 100 mm de altura e espaçamento de 100 mm cada, com um total de 5 furos por parede. Para garantir a estanqueidade do esquema, o produto foi inserido com um sistema de frascos, permitindo o controle da velocidade e do volume da injeção (Figura 4);



Figura 4. Aplicação dos bloqueadores químicos

f) Nova saturação das bases (lâmina d'água de 50 mm) por 28 dias. Durante este período, a massa foi medida aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

g) Após 28 dias, os corpos-de-prova foram retirados da água e colocados em temperatura ambiente até a estabilização da massa, o que ocorreu em 20 dias. Medição da massa no 20º dia (massa seca após tratamento);

h) O processo de saturação das bases foi repetido, com as paredes tratadas, para quantificar a ação preventiva. Após 8 dias, uma nova medição de massa (massa úmida após o tratamento) foi realizada para calcular a taxa de absorção de água após o tratamento.

A taxa de absorção de água foi calculada pela diferença entre a massa seca e úmida, dividida pela área de contato das paredes e da argamassa de base, conforme Equação 2.

$$\text{Taxa de absorção (kg/m}^2\text{)} = \frac{w_m - d_m}{A} \quad (2)$$

Onde “ w_m ” representa a massa úmida da parede, “ d_m ” a massa seca e “ A ” a área de contato dos blocos da primeira fileira com a umidade.

3.2.2 Termografia

O teste de termografia, considerado qualitativo ou complementar, permite o mapeamento de uma região, distinguindo zonas de diferentes temperaturas. Assim, este teste foi utilizado para monitorar a distribuição de umidade nos corpos de prova.

Foi utilizada a câmera termográfica FLIR T440 e, durante a captura das imagens, alguns parâmetros do equipamento foram fixados, como a emissividade (0,81) e a distância entre o corpo de prova e a câmera (2 m), visando uma melhor resolução. A temperatura atmosférica medida pela câmera, no momento do experimento, era de 23°C. Além disso, para melhorar o desempenho do equipamento, um fundo escuro foi montado e instalado atrás dos corpos-de-prova, aumentando a nitidez das imagens.

Usando o software PSPP2018, as temperaturas máxima e mínima da parede foram determinadas durante todo o período de teste. As escalas de cores adotadas foram iguais para todas as imagens para permitir a comparação visual. É importante ressaltar que neste teste a câmera fornece apenas o registro do parâmetro de temperatura, não incluindo a taxa de umidade ou qualquer outra informação. Assim, embora as imagens contribuam para um diagnóstico, não são necessariamente decisivas na análise.

3.2.3 Análise de custos

Para avaliar o custo de execução desse tipo de tratamento, foi investigado o valor de cada produto, e seu consumo medido considerando a espessura (90 mm) e o comprimento (1 m) das paredes testadas. Dessa forma, foi possível estimar qual dos bloqueadores químicos apresentou o melhor custo-benefício (ou seja, o menor custo por metro linear de parede tratada).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Taxa de absorção de água

A massa de cada corpo de prova testado foi registrada para calcular a taxa de absorção antes e após o tratamento químico. Os resultados são apresentados na Tabela 3 e na Figura 5.

Tabela 3. Taxa de absorção antes e depois do tratamento

Amostra	Área de contato (m²)	Antes do tratamento				Após tratamento				Redução (%)
		Massa seca – 21 de cura após a confecção (kg)	Massa úmida – 8 dias de contato com água (kg)	Taxa de absorção (kg/m²)		Massa seca – 21 de cura após a confecção (kg)	Massa úmida – 8 dias de contato com água (kg)	Taxa de absorção (kg/m²)		
				Por amostra	Média			Por amostra	Média	
T1	0,045	52,68	54,60	42,24	45,87	52,50	54,40	41,80	44,55	2,88
T2	0,045	51,65	53,90	49,50		51,60	53,75	47,30		
PA1	0,045	49,50	50,95	56,11	49,51	49,00	49,90	19,80	20,35	58,90
PA2	0,045	50,60	52,50	42,90		50,55	51,50	20,90		
PB1	0,045	47,90	50,45	31,90	36,85	47,60	48,25	14,30	11,00	70,15
PB2	0,045	48,50	50,45	41,80		48,20	48,55	7,0		

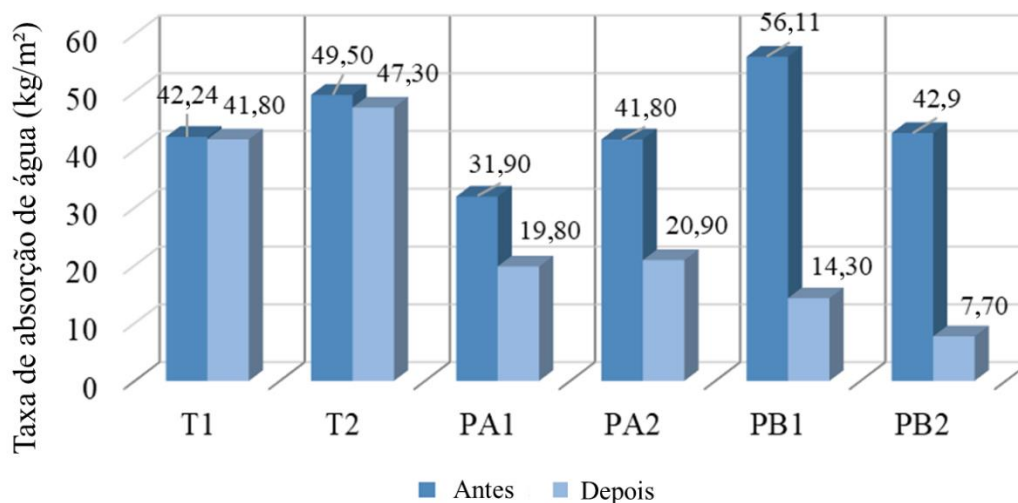


Figura 5. Taxa de absorção de água

Os valores da Tabela 3 demonstram que antes do início do tratamento ocorreu um aumento na massa dos corpos-de-prova quando expostos à umidade. Porém, de acordo com a Figura 5, os resultados mostram que ambos os produtos foram capazes de reduzir consideravelmente as taxas de absorção dos corpos-de-prova tratados. A aplicação do produto cristalizante resultou em uma redução média de 58,9% na taxa de absorção de água, enquanto para o produto hidrofugante essa redução foi de 70,15%. O fato das paredes de controle apresentarem um pequeno decréscimo na massa e, conseqüentemente, diminuição na taxa de absorção (2,88%), já era esperado devido ao processo de equivalência evidenciado entre a taxa de evaporação e absorção e, uma vez que esta pesquisa analisou um corpo de prova de tamanho reduzido, o processo ocorreu mais rápido do que normalmente seria quando comparado a uma construção de tamanho real.

Tabela 4. Massa das amostras durante o tratamento

Amostra	Massa durante o tratamento (kg)		
	7 dias	14 dias	28 dias
T1	-	-	54,25
T2	-	-	53,55
PA1	50,85	50,20	49,80
PA2	52,30	51,65	51,35
PB1	49,75	48,95	48,45
PB2	50,30	49,65	49,20

As medidas de massa durante o tratamento (7, 14 e 28 dias após a aplicação dos bloqueadores) são apresentadas na Tabela 4. Os resultados são equivalentes aos obtidos por Socoloski (2015) para os dois tipos de bloqueadores químicos, com os menores valores de massa obtidos em 28 dias de saturação. Isso pode ser explicado pelo fato de que, ao longo do tempo, a taxa de evaporação supera a taxa de absorção (esse índice diminui à medida que os poros se cristalizam ou com comportamento hidrofugante devido à ação química). Além disso, a redução de massa foi claramente superior com o produto hidrofugante. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 6.

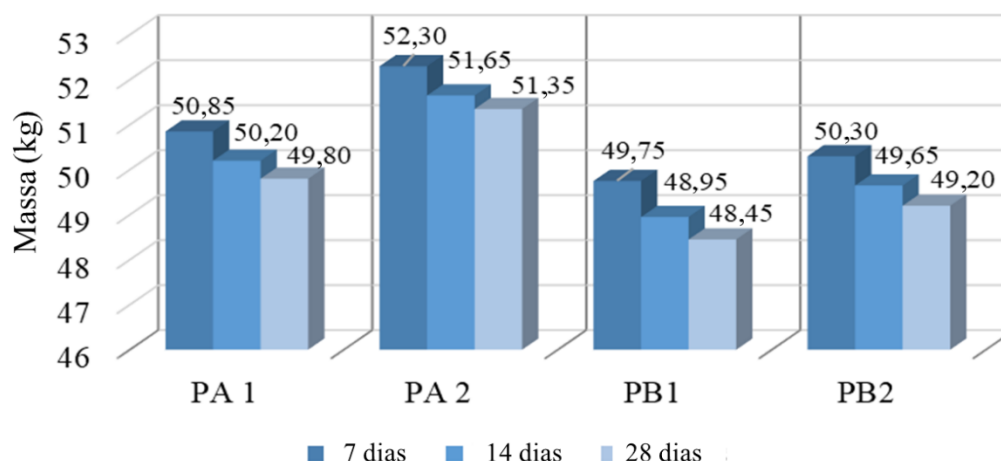


Figura 6. Comparação entre as massas durante o tratamento

Seguindo a avaliação do desempenho dos produtos, para a prevenção do fenômeno da umidade ascensional, a Figura 7 mostra uma comparação entre a massa úmida antes e depois do tratamento. Embora a prevenção não seja o foco principal do método avaliado, os resultados demonstram o potencial da utilização dos produtos como recurso preventivo na construção.

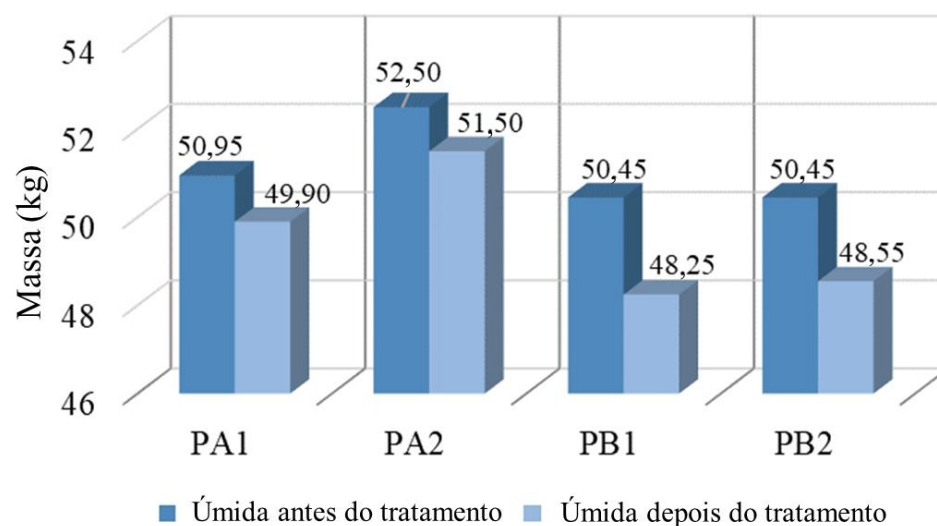


Figura 7. Comparação entre as massas úmidas antes e depois do tratamento

Para confirmar se as reduções na taxa de absorção foram significativas, os resultados foram tratados estatisticamente e analisados pelo método de variância (ANOVA). O desfecho é apresentado na Tabela 5 e classifica a diferença como significativa.

Tabela 5. Análise de variância

Propriedade		Soma quadrada	Graus de liberdade	Média quadrada	Teste de Fisher	Significante
Absorção	Entre grupos	1199,11	2	599,55	47,95	Sim
	Dentro grupos	37,51	3	12,50	-	-
	Total	1236,62	5	-	-	-

Para verificar as dissimilaridades dos grupos, foi realizado o teste de Fischer. Observou-se que, estatisticamente, não houve diferença significativa entre os resultados comparando os produtos cristalizantes e repelentes de água. Porém, quando comparadas às amostras não tratadas (grupo controle), obteve-se uma redução significativa na taxa média de absorção, indicando a eficácia do tratamento (Figura 8).

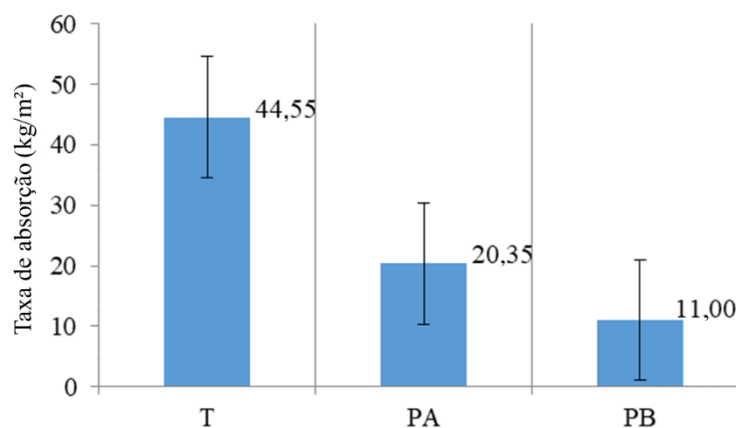


Figure 8. Comparação entre a taxa de absorção média após o tratamento

4.2 Termografia

As imagens obtidas pelo teste de termografia, Figuras 9 a 12, demonstram qualitativamente a temperatura dos corpos de prova antes do tratamento e aos 28 dias de tratamento. As áreas com cores mais claras, tons de laranja, representam temperaturas mais altas (ou seja, regiões mais secas).

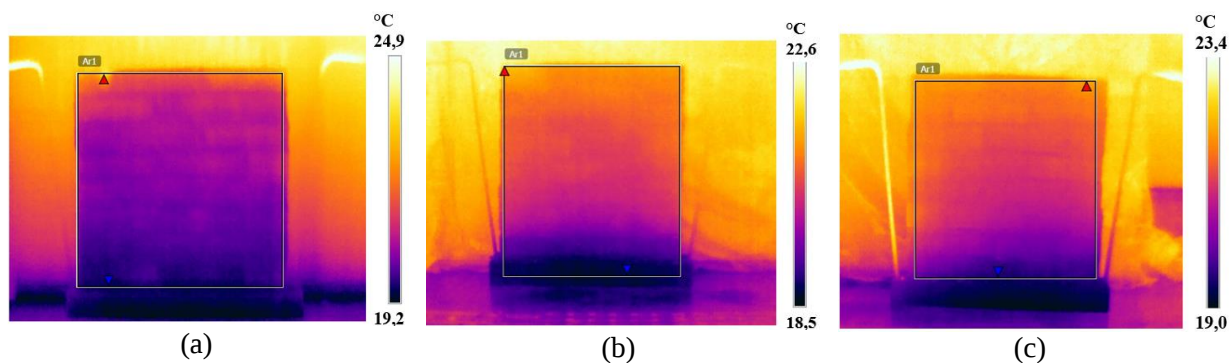


Figura 9. Amostra PA1: a) parede seca; b) parede úmida; c) parede aos 28 dias

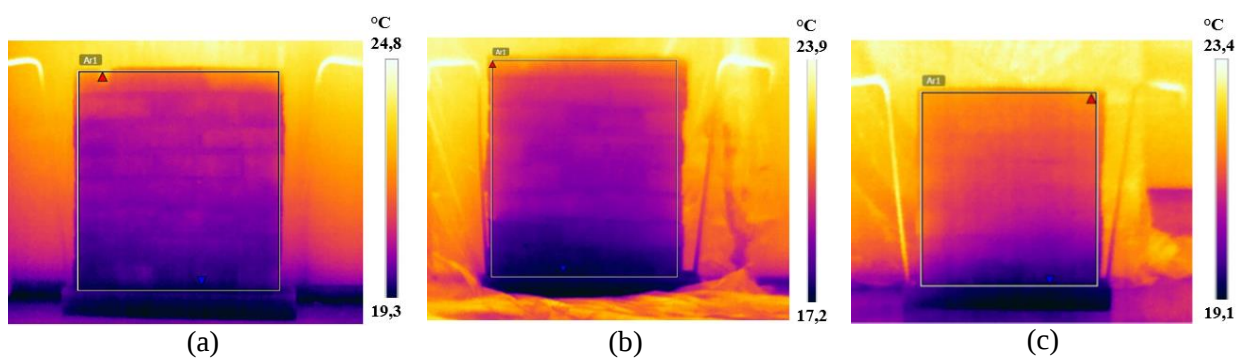


Figura 10. Amostra PA2: a) parede seca; b) parede úmida; c) parede aos 28 dias

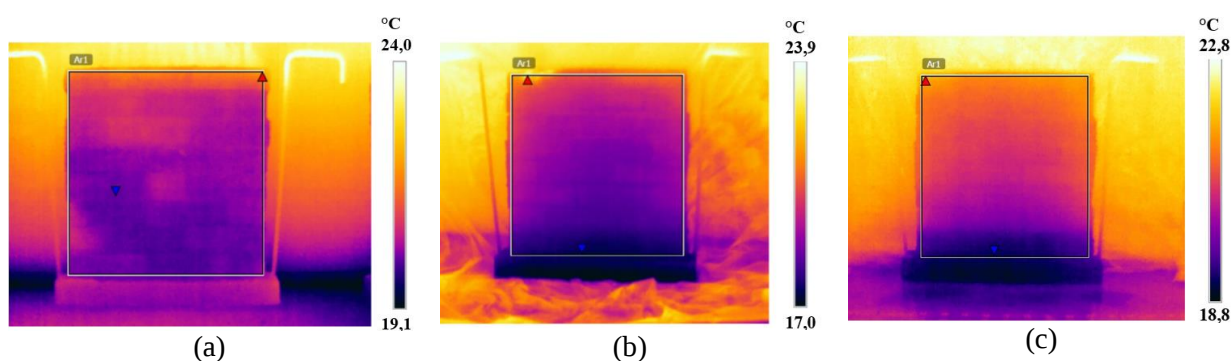


Figura 11. Amostra PB1: a) parede seca; b) parede úmida; c) parede aos 28 dias

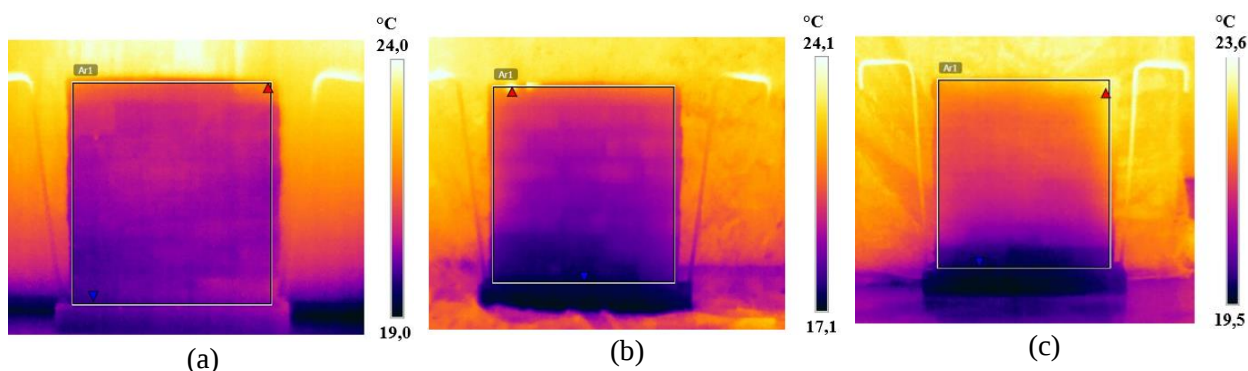


Figura 12. Amostra PB2: a) parede seca; b) parede úmida; c) parede aos 28 dias

De maneira geral, as imagens mostram inicialmente que, antes do tratamento e com a parede seca, havia umidade distribuída por toda a parede, exceto na parte superior e nas bordas, devido ao maior contato com o ar nesses locais. Após a saturação das bases, as paredes apresentam uma faixa azul-escura acentuada, próxima à base, que caracteriza a presença de umidade ascensional. Aos 28 dias de tratamento, foi observada redução da faixa de umidade, indicando um desfecho favorável dos produtos aplicados.

4.3 Análise de custos

Ao analisar o desempenho dos produtos, ambos foram absorvidos pelas paredes em um período de aproximadamente 1 dia, com um consumo por furo de 125 ml para o produto A (cristalização) e 60 ml para o produto B (hidrofugante). Embora a redução na taxa de absorção de água, causada pelos dois produtos, não tenha apresentado diferença estatística, o hidrofugante apresentou o melhor custo-benefício, chegando a quase 1/5 do valor do produto cristalizante, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Análise de custo

Parâmetro	Produto		
	A (Cristalizador)	B (Hidrofugante)	
Volume embalagem (L)	1,00	25,00	18,00
Preço (R\$)	36,50	595,00	189,00
Consumo (l/m)	1,25	1,25	0,60
Custo (R\$/m)	45,63	29,75	6,30

O custo por metro linear do hidrofugante foi de R\$ 6,30, enquanto o cristalizante atingiu R\$ 29,75, representando um acréscimo de mais de 4 vezes.

5. CONCLUSÕES

- Verificou-se que ambos os produtos apresentaram redução significativa nas taxas médias de absorção de água dos corpos-de-prova.
- O produto cristalizante gerou uma redução média, quando comparado às paredes não tratadas, de 32% na taxa de absorção de água, enquanto o produto hidrofugante 28,18%. Porém, estatisticamente, essa diferença não foi significativa, indicando que ambos apresentam o mesmo desempenho.
- Em relação ao custo-benefício (fator decisivo na escolha do bloqueador), concluiu-se que o hidrofugante teve uma vantagem sobre o cristalizante, com um custo cerca de 5 vezes menor.
- Embora o sistema de injeção, utilizado nesta pesquisa, tenha sido projetado para evitar vazamentos e controlar a velocidade de aplicação, a injeção foi ocasionalmente obstruída durante a aplicação do produto em cristalização, mostrando a necessidade de estudar a velocidade ideal de injeção. A execução desta técnica fora do ambiente de laboratório provavelmente geraria problemas ergonômicos, devido à sua complexidade no escopo do equipamento. A necessidade de estudos sobre novos métodos de aplicação de produtos se apresenta como imprescindível na criação de um sistema in situ mais prático.
- Por fim, é de referir que a ocorrência de umidade ascendente não é uma patologia simples e a procura de conhecimentos e de novas técnicas, que possam melhorar o desempenho das edificações e reduzir os custos do tratamento, é de grande importância.

6. REFERÊNCIAS

- Alfano, G., Chiancarella, C., Cirillo, E., Fato, I. F. (2006), *Long-term performance of chemical damp-proof courses: twelve years of laboratory testing*. Building and Environment. 41:1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.017>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15270: Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010), “*Materiali da costruzione: degrado, prevenzione, diagnose, restauro*”, Editore CittàStudi; 2ª ed., Sondrio/Italy.
- Carrió, J. M. (1997), “*Patología de Cerramientos y Acabados Arquitectónicos*”, Munilla-Leria; 2ª ed., Madrid/Spain.
- Dreyer, J., Hecht, C. (2001), *Injection methods for retrofitting of moisture damaged constructions*. Transactions on the Built Environment. 55: 517-526.
- Franzoni, E. (2018), *State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry*. Journal of Cultural Heritage. 31: S3-S9. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001>
- Franzoni, E. (2014), *Rising damp removal from historical masonries: a still open challenge*. Construction and Building Materials. 54: 123-136.
- Franzoni, E., Rirsch, E., Paselli, Y. (2016). “*Laboratory models for the assessment of the effectiveness of chemical damp-proofing in masonry: existing methods and some proposals for new fixtures*”, in: International RILEM Conference Materials, Paris.
- Freitas, R. J. G. (2014), “*Técnicas de tratamento/control de humidade ascensional – Catálogo*”, Masters Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Freitas, V.P.; Torres, M.I.M.; Guimarães, A. S. (2008), “*Humidade Ascensional*”, FEUP edições; 1.ª ed., Porto/Portugal.
- Guimarães, A. S., Delgado, M. P. Q., De Freitas, V. P. (2016), *Treatment of rising damp in historic buildings: experimental campaign of wall base ventilation and interface effect analysis*. Cultural Heritage. 20: 733-738. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.012>
- Hacquebord, A., Lubelli, B., Lubelli, R., Nijland, T. (2013), *Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations*. Procedia Chemistry. 8: 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2013.03.019>
- Hess, R. P. J., Lubelli, B. H. A. (2018), *New test methods to verify the performance of chemical injections to deal with rising damp*. Journal of Cultural Heritage. 31: S52-S59.
- Henriques, F. M. A. (1994), “*Humidade em Paredes*”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Henriques, F. M. A. (2007), “*Humidade em Paredes*”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- I’anson, S. J., Hoff, W. D. (1988), *Chemical injection remedial treatments for rising damp–I. The interaction of damp-proofing fluids with porous building materials*. Building and Environment. 23: 171-178. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90001-7)
- Larsen, P. L. (2012), *Determination of water content in brick masonry walls using a dielectric probe*. Journal of Architectural Conservation. 18, 47-62. <https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785103>
- Lubelli, B., Van Hees, R. P. J., Hacquebord, A. (2013), *Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees*. Construction and Building Materials. 40: 891-898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.062>

- Luso, E. (2002), “*Contribuição para intervenções no Centro Histórico de Bragança*”. Masters Thesis, Universidade de Minho, Minho.
- Massari G., Massari I. (1993), *Damp Buildings, Old and New*. ICCROM, 17: 2-30.
- Rirsch, E., Zhang, Z. (2010), *Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties*. Construction and Building Materials. 24: 1815-1820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024>
- Sandrolini, F., Franzoni, E. (2016), *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment. 41: 1372-1380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.023>
- Socoloski, R. F. (2015), “*Tratamento de umidade ascensional em paredes através de barreiras químicas por gravidade*”, Masters Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Socoloski, R. F., Masuero, A. B. (2019), *Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity*. Construction and Building Materials. 210: 660-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.018>
- Torres, I. M. (2013), *Wall base ventilation system to treat rising damp: the influence of the size of the channels*. Journal of Cultural Heritage. 15: 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.03.005>
- Torres, R. J. de M. M. (2014), “*Humidades ascensionais em paredes de alvenaria de edifícios antigos*”, Masters Thesis, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 2014.

Influência do índice de vazios do concreto celular na corrosão das barras de aço

C. F. G. Nascimento^{1*} , A. A. Demétrio Filho² , T. M. Silva³ , I. A. R. Teixeira² ,
D. C. M. Neves² , E. C. B. Monteiro^{1, 2} 

* Autor de Contato: carlosfernando.gn@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.507>

Recepção: 06/09/2020 | Aceitação: 09/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

O objetivo deste estudo foi compreender se os vazios intensificam o desencadeamento da corrosão de armaduras no concreto celular, utilizando placas com massas específicas leves. A metodologia foi baseada em quatro testes: inspeção visual, potencial de corrosão, resistividade elétrica e perda de massa. Em relação à família L1, as famílias L2 e L3 (maior teor de ar) mostraram ser mais suscetíveis à corrosão de armaduras, bem como na quantidade de massa perdida das barras de aço, em 90% dos casos. Entretanto, o comportamento de algumas placas indica que existe a possibilidade de o processo ser assintomático em relação ao manchamento, considerando que a influência do cobrimento foi verificada no processo de corrosão das barras de aço.

Palavras-chave: índice de vazios; concreto leve; corrosão das armaduras.

Citar como: Nascimento, C. F. G., Demétrio Filho, A. A., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Neves, D. C. M., Monteiro, E. C. B. (2022), "*Influência do índice de vazios do concreto celular na corrosão das barras de aço*", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 76 – 97, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.507>

¹ Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, Brasil.

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

³ Departamento de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor A. A. Demétrio Filho, contribuiu com a ideia original e pela concepção do estudo. A autora E. C. B. Monteiro, foi responsável pela supervisão e diretrizes para a redação do trabalho. O autor I. A. R. Teixeira, contribuiu com 60% e o autor D. C. M. Neves com 40% da coleta de dados. O autor C. F. G. Nascimento foi responsável pela compactação dos resultados, discussões e análises laboratoriais. Finalmente, a autora T. M. Silva contribuiu com o fechamento e as conclusões do artigo.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Influence of the void ratio of cellular concrete on the corrosion of steel reinforcement

ABSTRACT

The objective of this study was to understand whether voids intensify the triggering of reinforcement corrosion in cellular concrete, for slabs with light specific masses. The methodology was based on four tests: visual inspection, corrosion potential, electrical resistivity, and mass loss. In relation to the L1 family, the L2 and L3 families (higher air content) were shown to be more susceptible to reinforcement corrosion and mass loss from the steel bars in 90% of cases. However, the behavior of some slabs indicates the possibility of the process being asymptomatic with regard to staining, considering that the influence of the cover on the corrosion of the steel bars was verified.

Keywords: void ratio; lightweight concrete; reinforcement corrosion.

Influencia del porcentaje de vacíos del concreto celular en la corrosión del acero de refuerzo

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comprender si los vacíos intensifican el desencadenamiento de la corrosión de la armadura en el hormigón celular, utilizando losas con masas específicas ligeras. La metodología se basó en cuatro pruebas: inspección visual, potencial de corrosión, resistividad eléctrica y pérdida de masa. En relación con la familia L1, las familias L2 y L3 (mayor contenido de aire) se mostraron más susceptibles a la corrosión de las armaduras, así como en la cantidad de masa perdida de las barras de acero en el 90% de los casos. Sin embargo, el comportamiento de algunas losas indica que existe la posibilidad de que el proceso sea asintomático en cuanto a la mancha, considerando que se verificó la influencia de la cubierta en el proceso de corrosión de las barras de acero.

Palabras clave: porcentaje de vacíos; hormigón ligero; corrosión del refuerzo.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é um dos materiais mais utilizado e difundido no mundo devido as suas propriedades físicas e mecânicas, na qual abrange questionamentos sobre durabilidade. Fatores como estes, estimulam o interesse na descoberta de novas tecnologias e de novos compostos como proposta para a melhoria de algumas características ou aplicabilidade (Mechtcherine et al., 2020; Nguyen; Castel, 2020; Kanellopoulos et al., 2020).

Com o crescimento tecnológico, no que diz respeito ao uso do material, foi possível produzir concretos com características especiais, como por exemplo, concretos leves utilizados para isolamento térmico. Desta forma, a ampla utilização desse material é particularmente atribuída aos benefícios da redução da massa específica e a densidade, economia trazida com fôrmas, escoramento e nos custos de transporte de peças no caso de estruturas pré-fabricadas (Khodabakhshian et al., 2018; Zhang et al., 2020).

O concreto celular é outro tipo de material menos denso, no qual é o principal objeto de estudo desta pesquisa onde, é produzido com aditivos que incorporam bolhas de ar no concreto, diminuindo sua massa específica (Stumm; Schweike; Stemmermann, 2018; Trong; Asamoto; Matsui, 2018; He et al., 2018; He et al., 2019). Considerando as diversas utilidades do concreto celular quanto a suas características frente a leveza e menor peso específico, existe uma preocupação quanto ao uso deste tipo de material para peças estruturais de concreto armado, no que diz respeito ao seu comportamento frente a propagação da corrosão das barras de aço, devido à quantidade de vazios no interior do material e à menor resistência mecânica (Du et al., 2020).

A durabilidade do concreto é uma questão essencial, pois permite compreender o desempenho do material durante toda a vida útil de uma estrutura (Kashani et al., 2017). Além disso, ela pode ser afetada pela ação de agentes agressivos externos, como íons cloreto e (CO_2) – dióxido de carbono (Shon et al., 2018; Nascimento et al., 2021).

Um dos principais problemas relacionados à durabilidade do concreto armado é a corrosão das barras de aço que pode levar à perda ou degradação das propriedades estruturais do material. De acordo com Badar et al., (2014), concreto de boa qualidade proporciona as condições necessárias para promover o pH da camada passivadora do aço.

A hipótese principal deste estudo é a seguinte: os vazios presentes pela incorporação de ar no interior do concreto celular, "mitigam" a corrosão das barras de aço e tornam o processo assintomático, ou seja, sem rachaduras ou manchas na face externa do elemento? Esta hipótese se torna viável observando que os concretos que passam pelo processo do ciclo de congelamento-degelo são "protegidos" com a incorporação intencional de ar.

Em resumo, então, o objetivo principal do estudo é avaliar o comportamento dos elementos de concreto armado sob o processo de corrosão ao utilizar concreto celular (com ar incorporado). Esta pesquisa não só fornece uma referência para determinar o comportamento do concreto celular, mas também como uma proposta que abrande algumas informações úteis para sua aplicação no setor da construção civil.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Para a fabricação do concreto celular, foram utilizados os parâmetros estudados por Mariz (2013), do qual, realizou avaliações de durabilidade sobre o concreto celular. Os parâmetros de teste foram selecionados como base inicial para os procedimentos de dosagem e seus resultados, quanto a massa específica, foram semelhantes aos analisados neste estudo.

O cimento utilizado foi o tipo CPV – ARI MAX, marca nacional. Este tipo de aglomerante foi escolhido devido a seu rápido ganho de resistência e ausência de aditivos.

O teor de adições minerais que contém em outros tipos de cimento, poderia contribuir para o refino e preenchimento dos poros no interior do concreto, o que dificulta a entrada de agentes agressivos e, conseqüentemente, impede o início do processo de corrosão das barras de aço.

Foi utilizado o agregado miúdo natural (areia), de origem quartzosa, da região Metropolitana de Recife/PE. A areia natural foi adquirida por uma empresa levando em consideração as características físicas da mesma. O material estava em estado úmido e, portanto, foi necessário corrigir o teor de água por secagem natural. Para garantir o teor de umidade, 600 g de material foram dispostas numa estufa por cerca de 24 horas a uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e, após este procedimento, 300 g foram utilizados para o teste de caracterização granulométrica levando em consideração a granulometria do agregado miúdo de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Nesse contexto, foi necessário analisar a zona ótima de utilização do agregado miúdo (areia), pois o mesmo pode influenciar na densidade ideal do composto cimentício (concreto). Através da distribuição granulométrica dos agregados, foi possível obter parâmetros como MF – (módulo de finura) de 2,93 e $D_{\text{máximo}}$ – (diâmetro máximo) de 4,5 mm, sendo classificado como agregado miúdo com grãos médios bem distribuídos. Os resultados podem ser vistos na (Figura 1).

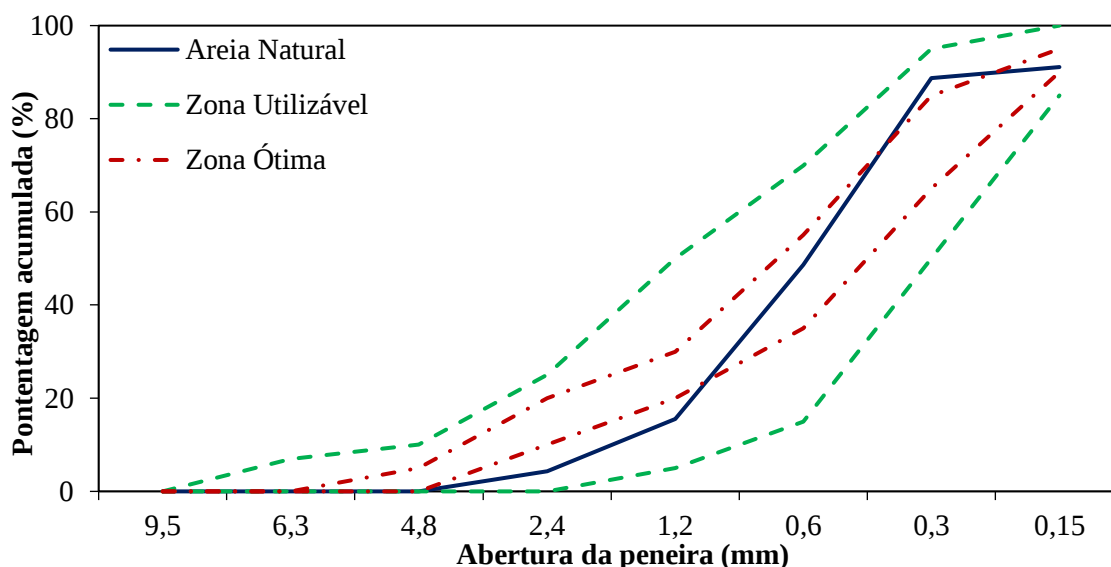


Figura 1. Curva granulométrica (agregado miúdo).

Os agregados graúdos (britas), também foram analisados e, após a classificação granulométrica, foi observado que, os mesmos, possuem um $D_{\text{máximo}}$ de 12,5 mm e MF de 6,48. Este valor foi escolhido levando em consideração a espessura da placa de concreto com apenas ($e = 50$ mm), respeitando a recomendação de que o $D_{\text{máximo}}$ seja menor ou igual a 1/4 da menor dimensão do molde. A curva granulométrica do material não foi exposta nesta pesquisa, mas o tipo de agregado utilizado foi classificado como cascalho 1.

Os Aditivos utilizados foram: aditivo 1 – Techniflow 520, de MC Bauchemie. Este aditivo plastificante foi utilizado na dosagem matricial do concreto com massa específica normal (família R); aditivo 2 – Gethal 2011, da Gethal. É um aditivo orgânico/químico concentrado a base atmosférica. É utilizado na produção de concretos com massa específica inferior a 2000 kg/m^3 (famílias L1, L2 e L3). Após os testes preliminares, o traço unitário utilizado para a produção dos corpos-de-prova foi: $1_{\text{Cimento}} : 2,2_{\text{Areia}} : 2,6_{\text{Brita}} : 0,60_{(\text{a/c})}$ (relação mistura por peso) onde, em massa, obteve-se 353 kg/m^3 de cimento, $776,6 \text{ kg/m}^3$ de areia, 917 kg/m^3 e 211,8 litros de água; $M\% = 55\%$ (conteúdo de argamassa); $A\% = 10,5\%$ (relação água-material seco); Aditivo plastificante = 0,6%. Para o concreto leve, o aditivo plastificante foi substituído pelo filtro de ar (0,1% correspondente a massa de cimento), variando o tempo de mistura.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação das barras de aço

Antes dos testes, as barras foram higienizadas de acordo com a norma internacional G1-03 (ASTM, 2017). 72 barras de aço de cada bitola (6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm) foram cortadas com 30 cm de comprimento e 48 barras de cada bitola foram cortadas com 20 cm de comprimento. Após este processo, as barras de aço foram colocadas em uma solução feita com 500 ml de ácido clorídrico, 3,5 g de hexametilenotetramina e 1 L de água por 15 minutos. Em seguida, foram lavadas sob água corrente com a ajuda de escovas de aço, onde a camada de óxido superficial e as impurezas foram removidas. Após a secagem, as barras foram pesadas antes da indução do processo corrosivo.

2.2.2 Corpos-de-prova utilizados para análise

A metodologia utilizada para desenvolver este estudo, foi organizada para desenvolver condições para compreender o comportamento de elementos leves de concreto armado (concreto celular) sob o processo de corrosão das armaduras. Ao longo do processo, os elementos do material foram avaliados através de testes eletroquímicos (potenciais de corrosão e resistividade) e testes físicos em barras de aço (perda de massa e resistência à tração). Os corpos-de-prova foram desenvolvidos na forma de uma placa, (35 cm de largura x 35 cm de altura x 5 cm de espessura) como pode ser visto na (Figura 2).

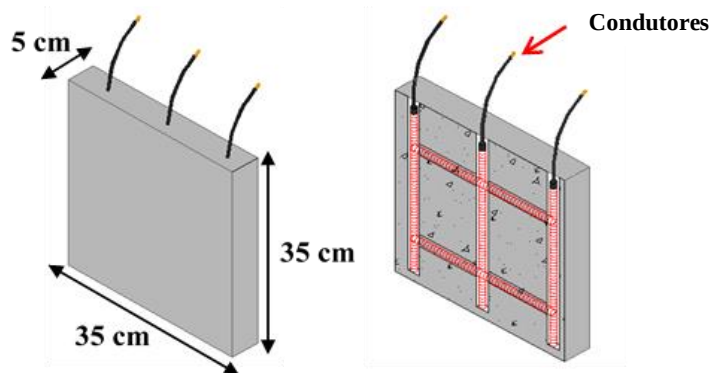


Figura 2. Representação esquemática da configuração do corpos-de-prova.

Os condutores de cobre permitiram a conexão das barras de aço com o exterior, controlando assim, o potencial de corrosão. A escolha de utilizar placas com apenas 5 cm de espessura, tinha o objetivo de facilitar a ativação do processo corrosivo através da entrada de íons cloreto, reduzindo a distância entre a barra e a superfície externa. As amostras foram distribuídas entre concretos com massa específica comum (referência) e três tipos de famílias de concreto celular – (L1, L2 e L3) com massas específicas leves. Esta distribuição pode ser vista em (Tabela 1).

Tabela 1. Número de placas desenvolvidas e respectivos comportamentos mecânicos.

Famílias de concretos	Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	Bitolas de aço – CA 50 (mm)			Número total de corpos-de-prova	Resistência à compressão (MPa)
		6,3	8,0	10,0		
R	2,3	6	6	6	18	33,5
L1	1,9	6	6	6	18	8,94
L2	1,7	6	6	6	18	2,15
L3	1,5	6	6	6	18	0,61

Para fins de análise, foi desenvolvida uma malha de aço com três barras verticais e duas barras horizontais, totalizando cinco barras dentro de cada molde de concreto. As barras verticais servem como elementos de conexão para as três barras horizontais (Figura 3), criando uma maior densidade de aço dentro da placa e, conseqüentemente, aumentando a possibilidade de observar os sintomas característicos de corrosão do aço.

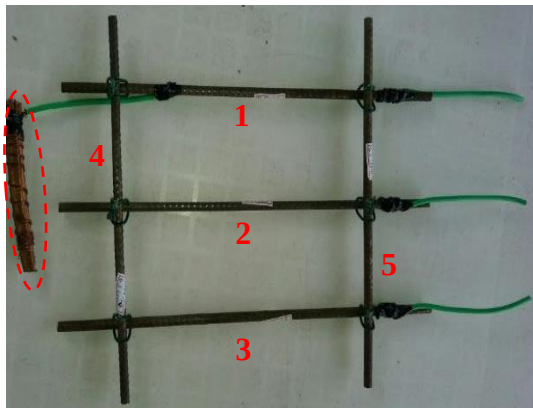


Figura 3. Processo de organização e conexão das barras de aço.

Para produzir os corpos-de-prova, foram utilizadas oito placas (2,10 m x 1,20 m) de madeira revestida com espessura de 18 mm. A fôrma revestida foi escolhida para proporcionar um melhor acabamento superficial das placas de concreto e, além disso, para otimizar a produção, o transporte e a concretagem das mesmas. Assim, foi escolhido um modelo retangular com dimensões de (1,50 m x 0,65 m x 0,35 m), com divisórias internas. Cada molde retangular contém 36 fôrmas. Este modelo é mostrado na (Figura 4).



Figura 4. Molde retangular com capacidade de produzir 36 fôrmas.

2.2.3 Produção dos corpos-de-prova de concreto e remoção das fôrmas

Um total de 72 placas (35 cm x 35 cm x 5 cm) foram produzidas e também foram realizados corpos-de-prova cilíndricos para os testes de caracterização mecânica do concreto, mas os resultados não foram apresentados nesta pesquisa. Devido à finura da placa, apenas 5 cm, a fim de facilitar a operação de concretagem e garantir um bom acabamento e preenchimento das fôrmas, não foram utilizados espaçadores para alinhar a malha metálica. As barras foram centralizadas no interior do molde à mão. Após a remoção das placas, elas foram mantidas protegidas a incidência direta da chuva e do sol por (28 dias) e o processo de molhagem e secagem em solução de água salgada foi iniciado. Antes do início do processo de corrosão, foi realizada uma inspeção visual com registro fotográfico para manter as características físicas externas das placas.

2.2.4 Indução de corrosão de barras de aço

Dois procedimentos foram utilizados para induzir a corrosão das barras de aço contidas nas placas de concreto. O primeiro procedimento, chamado (tipo 1), aplicava o princípio da corrosão galvânica. O cobre funciona como um cátodo e o aço torna-se o ânodo, perdendo elétrons (corrosão). Além disso, o material foi conectado à malha de aço (Figura 5 (a) e (b)) de cada placa, localizado no fundo da fôrma.

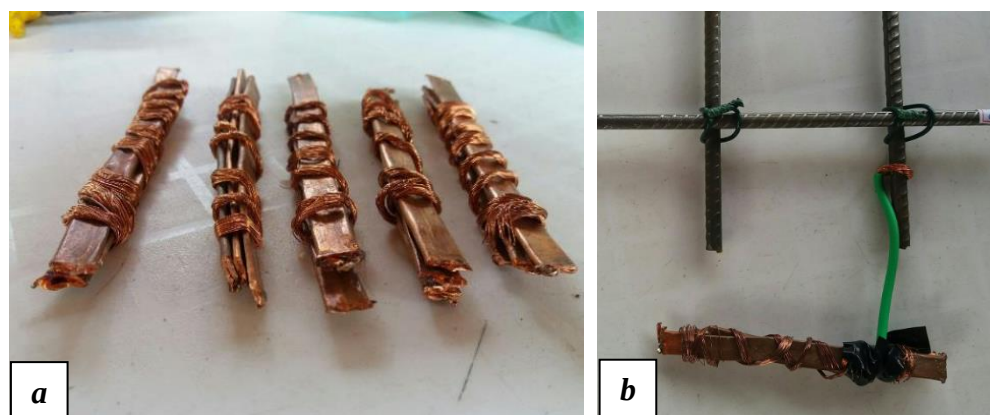


Figura 5. (a) Cobre para incidência da corrosão galvânica; (b) Material conectado a malha de aço.

O segundo procedimento (tipo 2) de indução de corrosão foi realizado através da inserção das placas de concreto já moldadas (Figura 6 (a) e (b)), através de repetidos ciclos úmidos e secos utilizando água em solução com 5% de NaCl (cloreto de sódio), com base na literatura e também em pesquisas realizadas por Ye et al., (2017). Após os 28 dias, uma outra inspeção visual e testes eletroquímico (potencial e resistividade) foram realizados antes de iniciar o processo de imersão das placas. Um ciclo completo consistiu em três dias de imersão (cerca de 25 cm de água cobrindo as placas) e quatro dias de secagem ao ar (protegido da incidência direta da luz solar).



Figura 6. (a) Corpos-de-prova de concreto moldados; (b) Placas de concreto inseridas em solução de NaCl para indução de íons cloreto.

2.2.5 Testes para controle da produção de concreto

Durante a produção dos concretos, foram realizados dois testes para controlar suas características. Foram eles: massa específica de concreto no estado fresco e endurecido, realizados de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008) e, para concreto leve, o resultado foi obtido de acordo com os procedimentos instituídos pela NBR 12644 (ABNT, 2014). Foram realizados testes de caracterização do concreto para cada família conforme suas massas específicas, a fim de ter

parâmetros comparativos e seus respectivos comportamentos durante o processo de corrosão das barras de aço.

2.2.6 Revestimento das barras de aço e espessura das placas de concreto

A fim de verificar o revestimento das barras de aço em ambas as faces das placas após a concretagem, foi utilizado equipamento baseado em sensores eletromagnéticos. Este equipamento, o Ferroskan PS200 da Hilti, foi utilizado para estimar a média de revestimento das barras em cada uma das placas. Além disso, algumas imagens foram feitas para verificar o posicionamento das barras. A e B foram nomenclaturas dadas às faces das placas para representar o posicionamento da malha de aço, conforme indicado na (Figura 7).

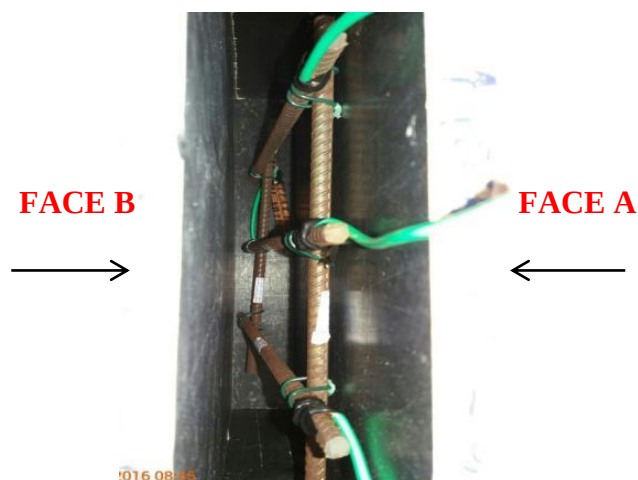


Figura 7. Esquema de representação das faces A e B das placas.

Em seguida, a espessura das placas foi medida com uma fita para calcular a cobertura das barras de aço em relação à face A.

2.2.7 Testes de monitoramento físico

O teste de controle físico foi dividido em duas fases: inspeção visual das placas e perda de massa. Quanto à inspeção visual das placas, foi realizada uma primeira análise alguns dias após a concretagem e antes do início dos ciclos de umedecimento e secagem. Durante o período de estudo, outras inspeções visuais foram realizadas ao final de cada ciclo de imersão incidida nas placas para monitorar a evolução da degradação. Para analisar a aparência visual das placas, foi desenvolvido um critério de avaliação para este estudo baseado na existência de manchas de corrosão e fissuras características que podem aparecer na superfície, como mostrado na (Tabela 2).

Tabela 2. Critério para avaliação visual do nível de degradação da laje.

Sem manchas ou rachaduras	Não relevante	●
Até três pequenas manchas	Deterioração suave	●
Entre quatro e cinco manchas pequenas e/ou uma grande	Moderado	●
Mais de cinco manchas pequenas e/ou mais de uma grande	Alto	●
Rachaduras e manchas de corrosão	Muito alto	●

O segundo tipo de teste de monitoramento físico, foi a avaliação da massa das barras perdidas no final do processo de corrosão. Com estas informações, foi possível verificar quais placas e quais famílias foram mais afetadas pelo tempo de exposição ao agente agressivo. Depois de remover todas as barras de aço, elas foram limpas com uma solução de ácido clorídrico e água, removendo todos os resíduos de concreto que poderiam ter aderido às barras, bem como os produtos de corrosão em excesso. Após uma limpeza completa, cada barra foi pesada, o que permitiu verificar a perda de massa, comparando os valores antes e depois do período de estudo. A NBR 7480 (ABNT, 2007) indica os requisitos e critérios para o uso de barras de aço para concreto armado. Para este caso, a norma estabelece o valor para a massa das barras por unidade de comprimento, de acordo com cada bitola, e também valores de tolerância.

2.2.8 Testes de monitoramento eletroquímico

Dois tipos de testes foram utilizados para monitorar a evolução e a probabilidade de corrosão das barras de aço presentes nas placas ao longo do tempo, o potencial de corrosão e a resistividade da superfície de concreto. O teste de potencial de corrosão foi realizado de acordo com o C 876 (ASTM, 2015), que orienta a avaliação dos critérios do teste. O equipamento utilizado foi o Canin+ da Proceq⁺. Foram testados doze pontos em cada placa: três linhas horizontais, uma na parte superior, uma no meio e uma na parte inferior, com quatro pontos em cada linha. Estes pontos foram localizados a 10 cm de distância. Desta forma, foi possível mapear todo o potencial de corrosão das placas em diferentes partes.

Para medir a resistividade superficial do concreto, foi utilizado o método dos quatro eletrodos (método Wenner) com o equipamento Resipod da Proceq. Assim como no teste de potencial de corrosão, a água foi pulverizada sobre a superfície do concreto antes de se fazer as leituras. Como recomendado por TC154-EMC (RILEM, 2003), cada medida de resistividade tomada, foi uma média de cinco leituras feitas a alguns milímetros de distância. Antes do início de cada ciclo de umedecimento e secagem, ou seja, após o período de secagem de quatro dias, imediatamente antes da reimersão das placas em água, foram realizados os testes de monitoramento eletroquímico mencionados acima.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A hipótese principal deste estudo questiona se o processo de corrosão das barras de aço no concreto celular pode ser assintomático (sem rachaduras ou manchas), diferente do concreto tradicional e, para isso, algumas considerações devem ser feitas. Não foi observada nenhuma ocorrência de fissuras em nenhuma das placas de concreto celular e nem no traço de referência (R). Quanto à coloração, apenas 7 placas (10%) eram assintomáticas, três da família R e quatro da família L1.

Não foi possível afirmar, somente com as condições desenvolvidas neste estudo, que o processo de corrosão das barras de aço no concreto leve não gerará rachaduras. Namkung et al., (2019) e Pachla et al., (2021) afirmam que para maiores valores de perda de massa, diferentes daqueles encontrados aqui, um maior volume de produtos de corrosão é gerado, levando a maiores tensões de expansão e, conseqüentemente, ao surgimento de micro fissuras.

De acordo com Zhang et al., (2020), a porosidade e o tamanho dos poros exercem efeitos significativos sobre os comportamentos mecânicos do concreto celular. A fase inicial de compactação do material tem um certo grau de dependência da porosidade, o que é explicado pelo colapso e compactação dos poros de superfície ou defeitos. Embora 90% das placas tenham tido cores em diferentes graus e intensidades, o revestimento variável destas placas deve ser levado em consideração.

A ocorrência de manchas mais frequentes foi encontrada na face "A". Ao se analisar a quantidade estimada de revestimento, em geral, para todas as famílias, a face "A" era mais fina que a face "B". É possível que comportamentos diferentes sejam encontrados quando há maior cobertura e uniformidade.

Uma informação interessante sobre as placas da família L1, que estavam assintomáticas, está relacionada com sua cobertura frente a proteção das barras de aço. Três, das quatro, tinham coberturas mais finas do que a média da família, e ainda assim não houve formação de fissuras. Estes resultados não corroboram as análises realizadas por Green (2020), onde relata que o processo de corrosão e, conseqüentemente, o manchamento, é independente da cobertura das barras de aço e ocorre expressivamente em ambientes agressivos.

As placas das famílias L2 e L3, as mais porosas, foram classificadas visualmente como mais degradadas, como foi verificado pela perda de massa através de testes de monitoramento eletroquímico. Houve também uma acentuada diminuição da resistência à compressão quando quantidades maiores de ar foram integradas ao concreto. Para isto, algumas placas tiveram maior perda de massa das barras de aço, e a família L3 teve a segunda maior porcentagem de perda. Para maiores níveis de perda de massa, é esperado que uma maior quantidade de produtos de corrosão seja formada e isto aparecerá mais intensamente na superfície das placas, como visto no estudo de Du et al., (2020). Entretanto, o resultado de algumas das placas em relação ao processo de corrosão e coloração foi contrário às expectativas. Estas placas foram classificadas visualmente como tendo uma degradação leve. Este é um exemplo onde existe a possibilidade dos poros "absorverem" as manchas (Figura 8 (a) e (b)) e na (Figura 9 (a) e (b)) e, este comportamento, também foi visto por Liu et al., (2020) e Liu et al., (2021).

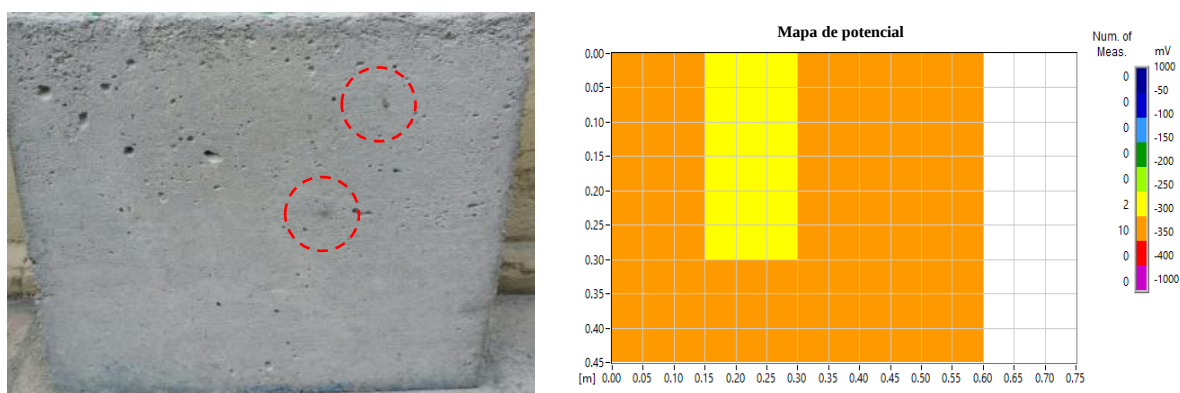


Figura 8. (a) “Absorção” dos produtos de corrosão através dos poros; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos graves não aparentes).



Figura 9. (a) “Absorção” dos produtos de corrosão através dos poros; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos graves não aparentes).

Mesmo que esta seja uma ocorrência isolada dentro de um comportamento geral, ela não deve ser ignorada. Finalmente, com relação à durabilidade e outras propriedades do concreto, observou-se que os concretos leves estudados eram mais suscetíveis à degradação das barras de aço do que os concretos de referência.

Chung et al., (2019), Dong et al., (2020), Al-Shwaiter, Awang e Khalaf (2021) relatam que a incorporação de materiais de baixa densidade em concretos reduz o consumo de energia, mas tem características que atendem a propriedades mecânicas mínimas para serem efetivamente utilizados como materiais de construção.

3.1 Inspeção visual

Das 18 placas de cada família, o grupo R tinha 67% classificadas como de grau leve e duas sem relevância. A segunda família "melhor" em termos de menor degradação visual, L1, apresentou apenas duas placas classificadas como tendo um alto grau de degradação. As duas famílias mais degradadas visualmente, de acordo com a classificação proposta, eram L2 e L3, tendo 44% e 61% das placas classificadas como de alto grau de degradação, respectivamente. Estas análises podem ser melhor vistas na (Figura 10).

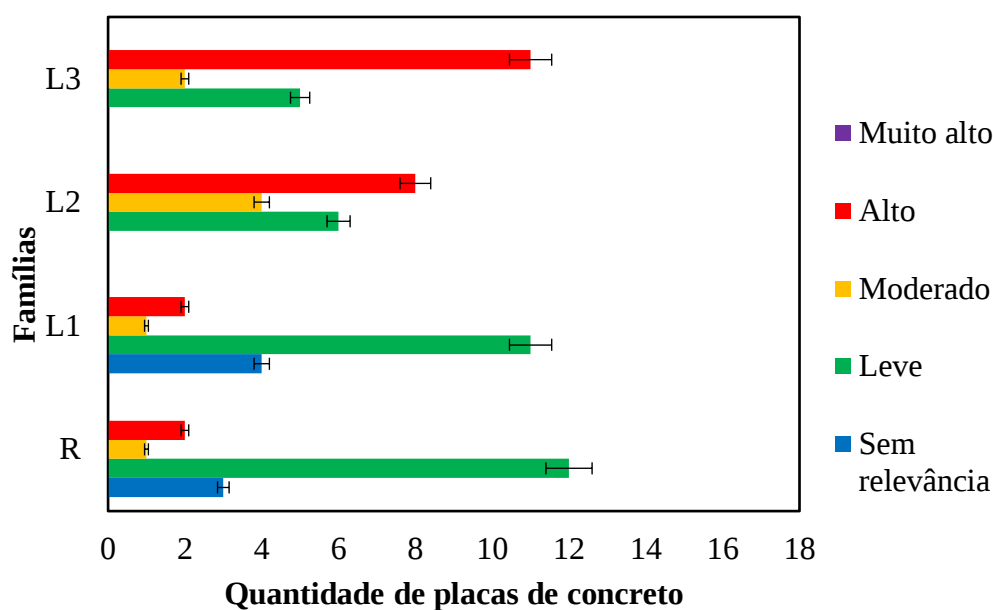


Figura 10. Classificação qualitativa do nível de degradação visual das placas.

No que diz respeito ao comportamento físico das placas de concreto, percebeu-se que a solução de Na^+Cl^- – cloreto de sódio desencadeou o processo de corrosão das barras de aço, onde alguns pontos manchados puderam ser vistos na superfície das placas. Na (Figura 11 (a) e (b)), correspondente as placas da família R, não foram evidenciados um alto nível de degradação e o mapa do potencial de corrosão afirmou que os valores variaram entre -350 mV a -400 mV.

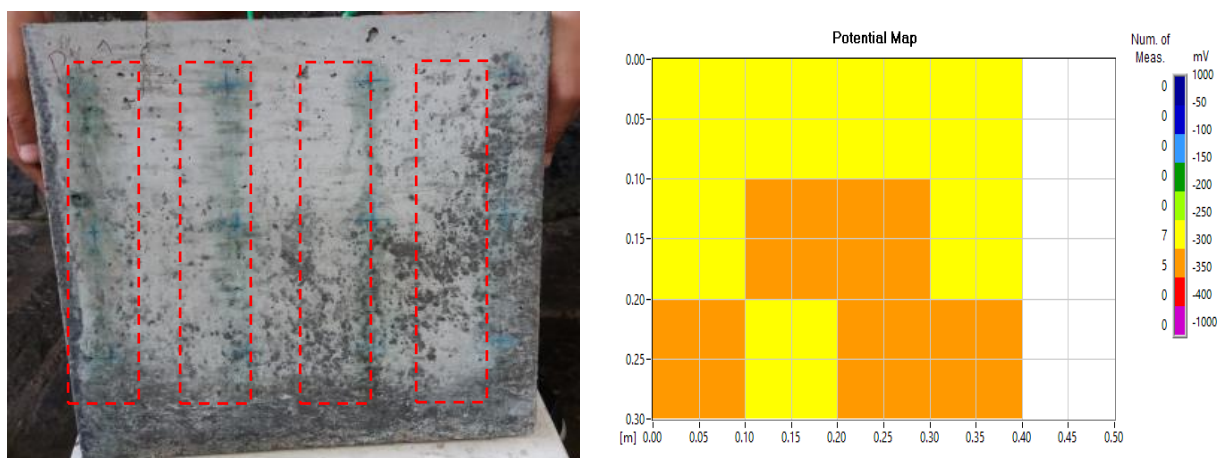


Figura 11. (a) Efeitos da degradação superficial das placas de concreto; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos leves).

Quanto as placas da família L1, percebeu-se que o processo de degradação dado pela presença de cloreto de sódio, afetou a durabilidade das barras de aço, conforme visto na (Figura 12 (a) e (b)). A corrosão pontual foi dada em pontos específicos da placa e as manchas superficiais ocorreram nas regiões, onde a camada de concreto estava mais fina. O mapeamento das barras de aço corroídas, comprovaram que os valores do potencial de corrosão variaram entre -250 mV a -350 mV.

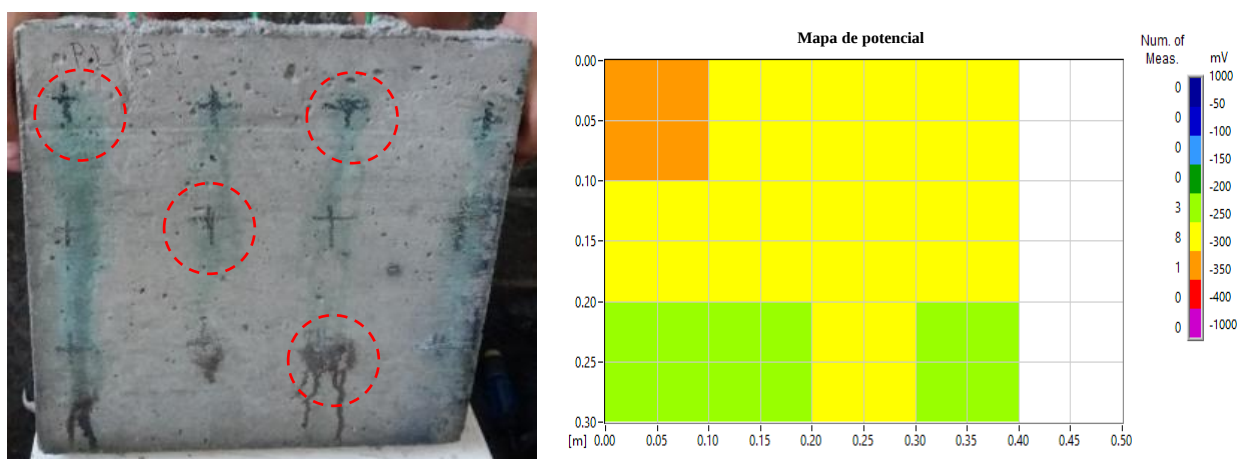


Figura 12. (a) Efeitos da degradação superficial das placas de concreto; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos leves).

O processo de degradação das armaduras no interior das placas de concreto das famílias L2 e L3, foram as mais severas e as manchas superficiais causadas pelo carregamento dos óxidos à superfície, se deu através do comportamento físico no interior do material. O teor de ar incorporado incidiu em um maior índice de vazios que facilitaram a ingressão dos íons cloreto, potencializando, sobretudo, a corrosão puntiforme. O mapeamento das barras de aço corroídas, comprovaram que os valores do potencial de corrosão variaram entre -400 mV a -1000 mV para ambas as famílias, conforme mostrado na (Figura 13 (a) e (b)) e na (Figura 14 (a) e (b)).

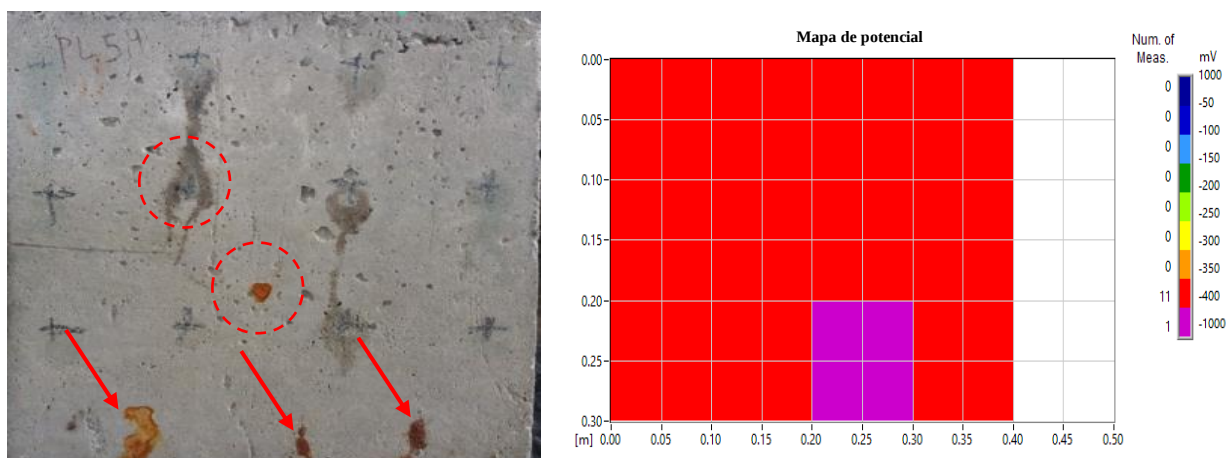


Figura 13. (a) Efeitos da degradação superficial das placas de concreto; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos graves).

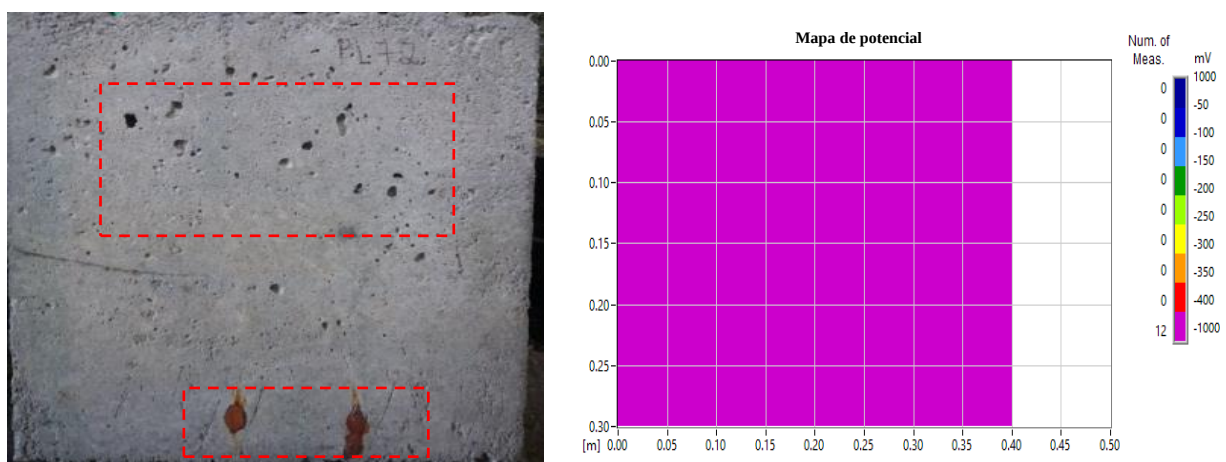


Figura 14. (a) Efeitos da degradação superficial das placas de concreto; (b) Mapa relativo ao potencial de corrosão (efeitos graves).

3.2 Potencial de corrosão

Os critérios de avaliação seguiram os procedimentos propostos pela C 876 (ASTM, 2015). Assim, valores mais eletro-negativos do que -350 mV, a probabilidade de ocorrência de corrosão é de 90%. Valores mais eletropositivos que -200 mV têm uma probabilidade de ocorrência de corrosão de menos de 10%.

Os valores entre estes limites estão na faixa de incerteza. Durante o período experimental, foram realizados 6 testes para medir o potencial de corrosão das placas. O primeiro foi realizado apenas alguns dias após a concretagem e o segundo imediatamente antes do início dos ciclos de imersão de NaCl. Os outros testes foram realizados durante o estudo para acompanhar a evolução da corrosão das barras de aço contidas nas placas de concreto.

Os resultados do potencial de corrosão de cada família podem ser vistos na (Figura 15). Neste sentido, entende-se que o valor que representa o potencial de corrosão da chapa deve ser o mais eletromecânico (ou seja, a pior condição) entre os 12 pontos medidos.

Os pontos mais escuros vistos após o teste, mostram as regiões onde as leituras foram feitas em uma área de (10 cm x 10 cm). Entre as 12 medições do potencial de corrosão, 10 se enquadram na região de incerteza, mas com valores próximos à região segura. Os outros dois pontos estão dentro de uma área com menos de 10% de probabilidade de ocorrência de corrosão.

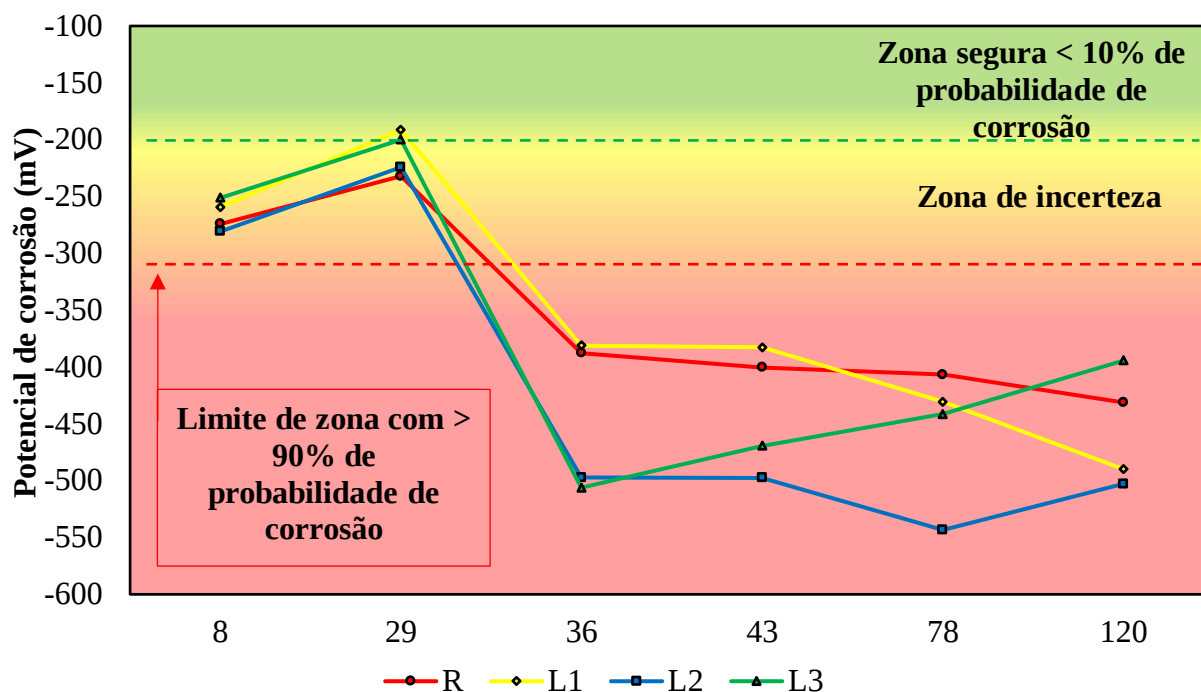


Figura 15. Comportamento do potencial de corrosão médio das famílias ao longo do tempo.

Alguns comentários podem ser feitos sobre a variação do potencial de corrosão para as placas de todas as famílias. As primeiras leituras, realizadas apenas alguns dias após a concretagem, estão na região localizada na zona de incerteza. Segundo Hou et al., (2021) isto ocorre devido à presença de cal na superfície do concreto ou à formação de uma película de água sobre a barra de aço.

Na segunda medição, há uma tendência para o potencial de deslocamento para a zona "segura", com uma probabilidade de corrosão inferior a 10%. Este comportamento é atribuído ao maior período de cura, com as placas sendo mais secas e protegidas. Imediatamente após a segunda leitura, começou o período de imersão.

Na terceira leitura (aos 36 dias), é possível verificar uma queda repentina no potencial de corrosão, especialmente para as famílias mais porosas (L2 e L3). Ao comparar a família L3 com a família R, pode-se ver que a medida do potencial de corrosão a 120 dias é menos eletronegativa, mostrando -394 mV comparado ao resultado da família R que é -431 mV, ou seja, 9% menos que a família R, ocorrendo devido à alta atividade eletrolítica dos íons cloreto.

3.3 Resistividade elétrica

Para compreender os efeitos da resistividade elétrica no concreto celular, se é necessário analisar os parâmetros microestruturais do material, porém não foi uma variável de estudo nesse artigo. De acordo com She et al., (2018), Han, Lee e Byun (2021) a formação de vazios ou microporos na matriz do composto cimentício, potencializa a indução de agentes agressivos como o NaCl, pois a dimensão desses poros pode variar entre 100 μm a 350 μm , além das diferentes formas como pode ser visto na (Figura 16). Os autores ainda informam que, quanto maior o raio dos poros, maior a resistividade elétrica, estes variando entre 2 μm a 5 μm .

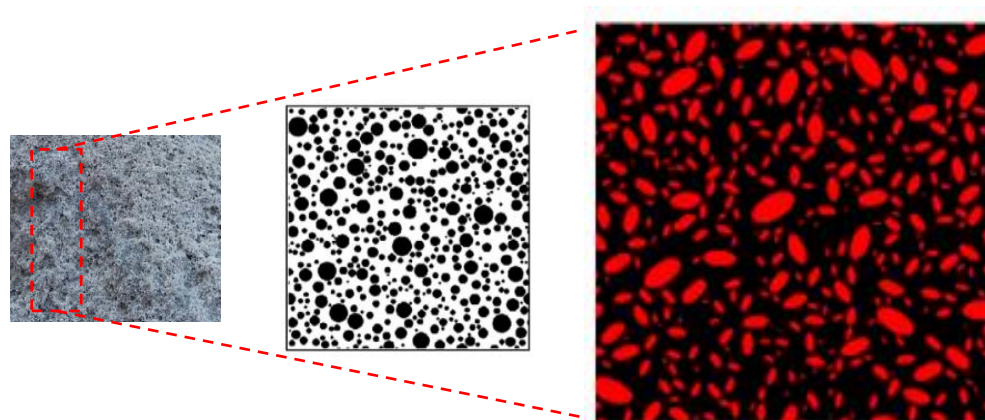


Figura 16. Exemplos de poros distribuídos aleatoriamente com diferentes formas e microestrutura gerada aleatoriamente com raios entre 2 μm a 5 μm . Fonte: Adaptado de She et al., (2018).

Nesse contexto, o monitoramento das estruturas de concreto armado é necessário, pois há ambientes, que solicitam das mesmas, maior tempo de vida útil e de serviço. Uma das questões a ser avaliada é o grau de degradação das estruturas, frente a permeabilidade ao cloreto de sódio (Yi et al., 2020). Segundo Lynch, Farrar e Michaels (2016), a resistividade elétrica é um parâmetro aplicado na detecção de danos, mas os resultados dessa técnica, em alguns compósitos cimentícios, talvez não sejam viáveis devido à influência incerta de muitos fatores nas medições obtidas. Consequentemente, há diversos estudos sobre a influência de fatores individuais para melhorar a confiabilidade dos resultados, tais quais: geometria do corpo-de-prova, relação água/ cimento, tipos de materiais percussores, tamanho dos agregados, condições de cura e a presença de barras de aço (Sanchez et al., 2016). Para esse estudo, foram desenvolvidas placas em concreto, contendo barras de aço em seu interior e, com relação à medição da resistividade elétrica das placas durante o período da permeabilidade do NaCl, foram observados valores mais altos inicialmente para as famílias L2 e L3 com 22,9 K Ω .cm e 36,2 K Ω .cm, respectivamente, dos quais podem ser vistos na (Figura 17).

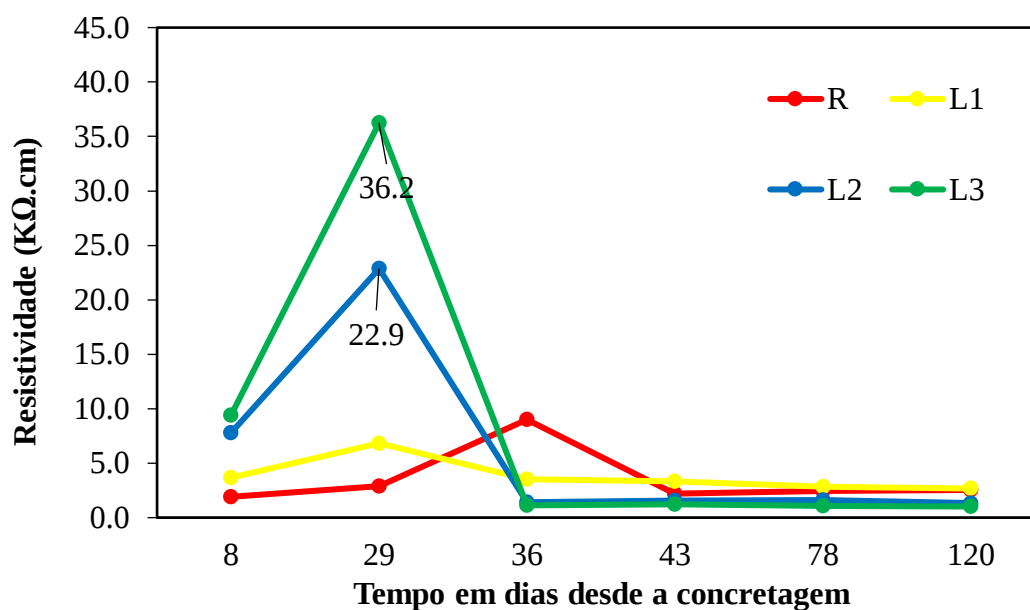


Figura 17. Comportamento da resistividade da superfície de concreto ao longo do tempo.

Pesquisas realizadas por Dong et al., (2020), corroboraram com os resultados obtidos nesse estudo, pois a resistividade elétrica de suas amostras aumentou acentuadamente de 4,5 KΩ.cm para 16 kΩ.cm em 29 dias. Para melhor contextualizar esse ponto, um período de "repouso" mais longo em um local seco protegido da chuva e do sol, potencializa a resistividade especificamente para matrizes cimentícias com níveis mais altos de ar incorporado (podendo perder mais facilmente a umidade retida) até 29 dias, devido à quantidade de poros formados.

Após o início das imersões, observa-se uma queda acentuada na resistividade, permanecendo até o final do período de estudo em torno de valores de 1 a 10 KΩ.cm, indicando uma alta taxa de atividade/corrosão, de acordo com os critérios adotados. Os dados corroboram com os estudos realizados por Michel, Sørensen, Geiker (2021), onde os resultados não indicaram nenhuma diferença significativa na resistividade elétrica, pois variaram entre 0,5 a 2,5 KΩ.cm.

Os estudos conduzidos por Alnahhal et al., (2021) e Lokeshwari et al., (2021) indicam que o uso de materiais de menor densidade no concreto celular, pode melhorar a resistividade elétrica, onde ela varia de 2,5 kΩ.cm a 5,0 kΩ.cm. Os resultados não corroboram os obtidos no estudo, pois quanto maior a porcentagem de ar incorporado, maior a taxa de corrosão das barras de aço. Este comportamento pode, possivelmente, ser explicado pela presença constante de íons cloreto (eletrólitos fortes, facilitando o movimento iônico) e a possível retenção de umidade dentro das placas de concreto, uma vez que foram dispostos a seco ao ar por períodos de 4 dias.

Com relação à resistividade elétrica da superfície das placas, todas as famílias tiveram comportamentos semelhantes. Segundo Dong et al., (2020), uma hidratação mais intensa pode acarretar um maior consumo de cimento e, sobretudo, elevadas temperaturas entre o interior e o exterior do concreto devido ao calor liberado. Esse processo pode formar microestruturas que permitem a passagem de partículas de íons cloreto no interior do composto cimentício e, por sua vez, uma menor resistividade elétrica. Por outro lado, os primeiros cem dias do período de cura são significativos para assegurar uma resistividade elétrica suficiente para conter a difusividade dos íons cloreto, pois quanto mais denso, menor a porosidade do material.

3.4 Perda de massa

A perda total de massa das barras de aço por família seguiu uma sequência, como mostrado na (Figura 18). As famílias L2 e L3, além de demonstrarem valores potenciais de corrosão mais eletronegativos, bem como um grau visual mais degradado (quantitativa e qualitativamente), também obtiveram maior perda de massa de aço (valores absolutos e percentuais).

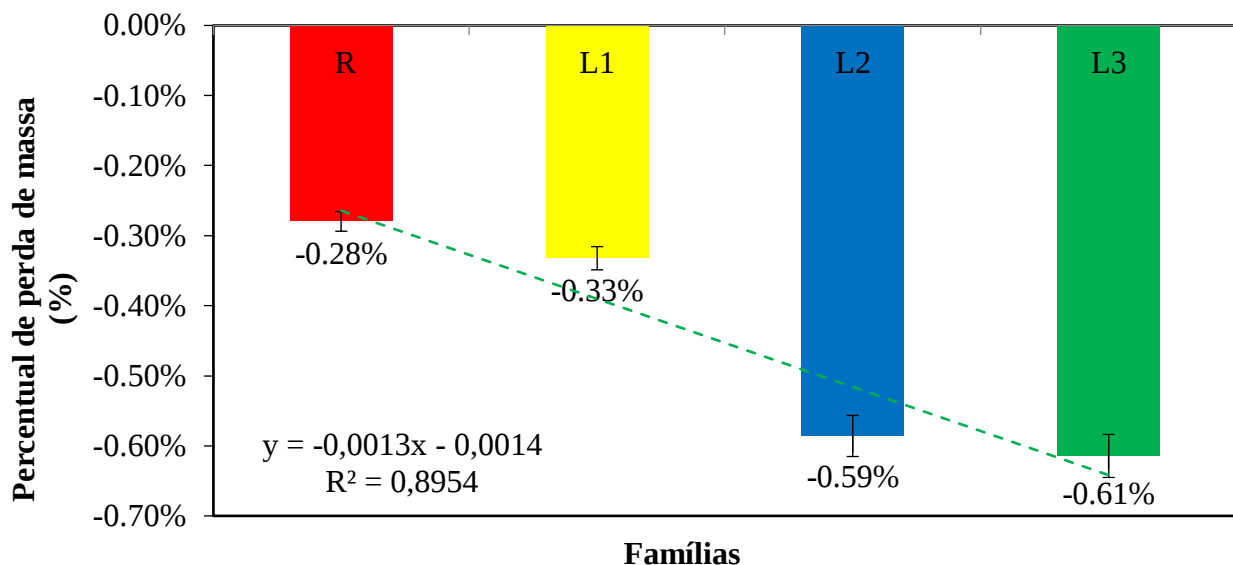


Figura 18. Porcentagem da perda total de massa das barras de aço por família.

Dentre as análises realizadas, foi observado que as placas de concreto possuem um percentual de perda de massa das barras de aço próximo de 2%, porém quando foram analisadas em conjunto (famílias), esse valor variou entre 0,6% a 1%. Um período mais longo de imersão na solução de NaCl provavelmente produziria valores mais altos de perda de massa, mas para este estudo não foi necessário, uma vez que os resultados obtidos são consideráveis frente a formação dos produtos de corrosão. Nesse contexto, a família L3 teve uma porcentagem maior de perda de massa (Figura 19), quando comparada com as famílias L1 (Figura 20) e L2 (Figura 21). Esse comportamento pode ter ocorrido devido ao conteúdo de ar formado na mistura do material na matriz cimentícia, tornando-a fixa. Outra variável que pode ser levada em consideração, é o tempo de mistura dos traços de concreto que foi entre 5 min a 20 min, onde o conteúdo de ar formado variou entre 5% a 40%.



Figura 19. Perda de massa das barras de aço (L3).



Figura 20. Perda de massa das barras de aço (L2).

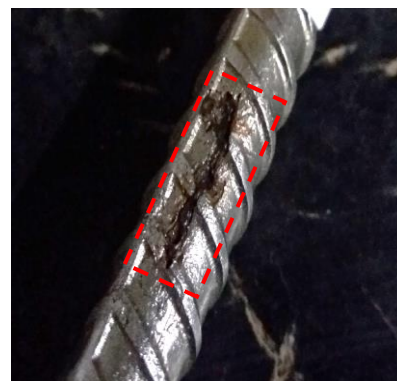


Figura 21. Perda de massa das barras de aço (L1).

Na (Figura 22), observa-se que quanto maior a percentual de ar incorporado no interior do composto cimentício (concreto celular), maior é a perda total de massa das barras de aço, pois o índice de vazios facilita a entrada de agentes agressivos. Ao observar a interação das variáveis dependentes e independentes, percebeu-se que o avanço dos produtos da corrosão frente ao teor de ar incorporado cresce exponencialmente como pode ser analisado pelo $R^2 = 0,9482$.

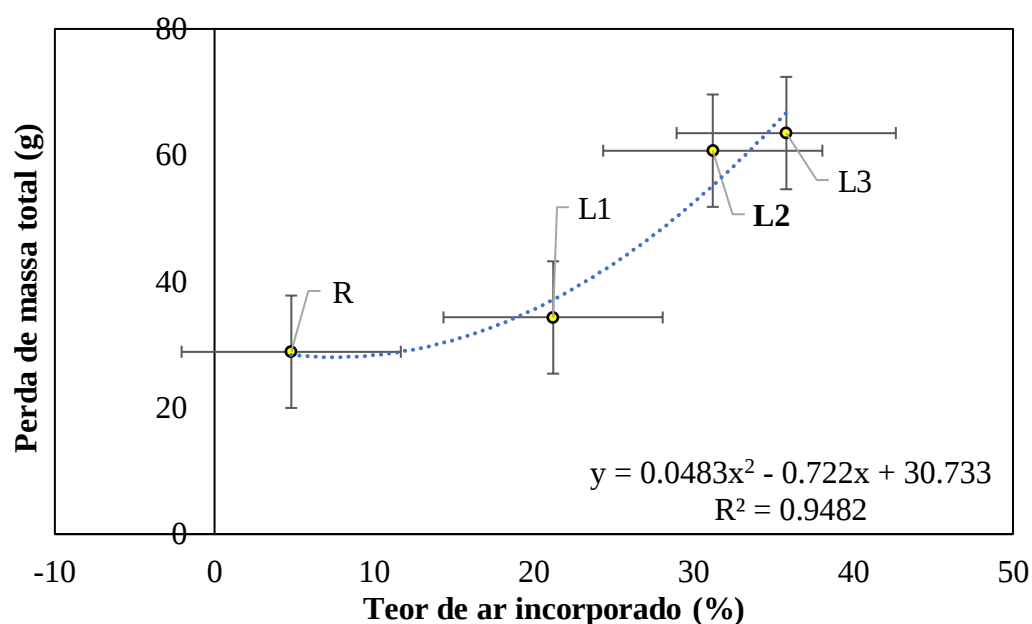


Figura 22. Regressão linear dos dados obtidos.

A perda de massa da família L3 (concreto celular) foi 55% maior do que a da família R (concreto de referência). Estes resultados mostram que o conteúdo de ar incorporado ao concreto deve ser inferior a 10%, pois interfere na melhoria das propriedades mecânicas e, além disso, potencializa o processo de corrosão das barras de aço integradas no interior do material.

Nesse sentido baixa resistividade da massa do concreto, tendem a valores de (E_{corr}) menos eletropositivos, destacando que as leituras de potencial de corrosão nem sempre estão atribuídas ao tempo de exposição do material em ambientes agressivos, mas também ao tipo de aditivo utilizado e a perda de massa das barras de aço no interior do composto cimentício. Para melhor contextualizar esse ponto, na (Figura 23 (a)), foi percebido que todas as famílias (R, L1, L2 e L3) tiveram leituras de potencial de corrosão entre -250 mV a -600 mV, porém os dados não foram estatisticamente diferentes a 5% de variância, como mostrado no diagrama de Pareto (Figura 23 (b)).

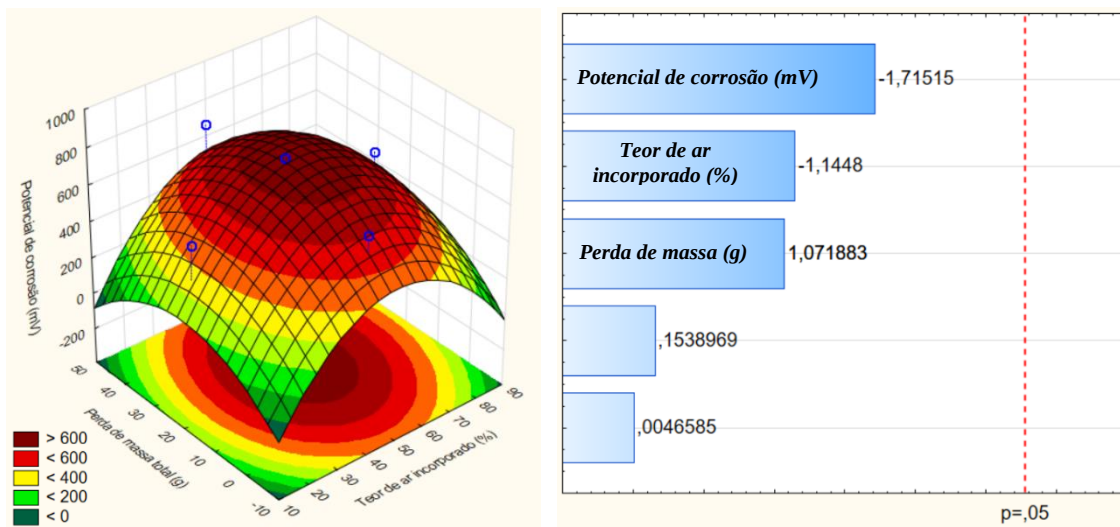


Figura 23. (a) Superfície resposta quanto as variáveis que influenciam o potencial de corrosão; (b) diagrama de Pareto.

4. CONCLUSÕES

Ao investigar se a corrosão de armaduras em concretos celulares é assintomática, não foi observada para nenhuma família de concreto ensaiado a presença de fissuras. Contudo, se faz necessário pontuar que em relação ao surgimento de fissuras, vale salientar que a não ocorrência se deu para os parâmetros específicos deste trabalho, por exemplo, o cobrimento utilizado (5 mm) sob condições severas de exposição a ciclos de molhagem e secagem em solução de NaCl. Outras considerações foram relevantes quanto aos ensaios realizados, tais quais:

- Em relação ao manchamento, apesar do alto índice de placas apresentarem este sintoma, a ocorrência pode estar relacionada ao cobrimento variável entre as faces das placas (A e B). Entretanto, as famílias de concreto que tiveram maiores teores de ar incorporado, obtiveram maior absorção de água, menor massa específica e resistência à compressão.
- Com relação aos ensaios, as famílias L2 e L3 (maiores teores de ar), apresentaram-se mais degradadas, visualmente, bem como obtiveram as maiores perdas de massa de aço. Dessa forma, a hipótese inicial, diante dos resultados e análises feitas, pode ser descartada, pois de acordo com os resultados obtidos, quanto maior a incorporação de ar, ao invés de mitigar a corrosão ocorreu um aumento da probabilidade de o concreto apresentar a corrosão de armadura.

- Quanto às análises de inspeção visual, o grupo R tinha 67% das placas classificadas como de grau leve e duas placas sem relevância. Com o percentual de 0,1%, a família L1, tinha um grau de degradação mais baixo que as famílias L2 e L3, tendo 44% e 61% das placas classificadas como alto grau de degradação, respectivamente;
- Com relação ao potencial de corrosão, as famílias R, L1, L2 e L3 têm o mesmo comportamento em 29 dias, com medição mais eletropositiva de -200 mV. Durante os 120 dias, o potencial de corrosão da família L3 é menos eletronegativo e possivelmente ocorre devido à alta atividade eletrolítica dos íons cloreto nas camadas mais internas do concreto celular;
- Quanto aos resultados da resistividade elétrica, sabe-se que em 29 dias as famílias L2 e L3 tiveram um grande aumento devido à estabilidade interna dos vazios e à presença de água que é facilmente perdida. Este comportamento proporciona ao concreto celular das duas famílias um risco de corrosão insignificante, já que é maior que 20 K Ω .cm. A partir de 36 dias, todas as famílias apresentam um risco muito alto de corrosão, já que os valores obtidos estão entre 0 e 5 K Ω .cm;

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003), *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007), *NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008), *NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014), *NBR 12644: Concreto celular estrutural – Determinação da densidade do concreto no estado fresco*. Rio de Janeiro.
- Al-Shwaiter, A., Awang, H., Khalaf, M. A. (2021), *The influence of superplasticiser on mechanical, transport and microstructure properties of foam concrete*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 1(1):1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.010>
- Alnahhal, A. M., Alengaram, U. J., Yusoff, S., Singh, R., Radwan, M. K. H., Deboucha, W. (2021), *Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material*. Journal of Building Engineering. 35(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2020.102047>
- ASTM G1-03, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM C876-15, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

- Badar, S., Patil, K. K., Bernal, S. A., Provis, J.L., Allouche, E. N. (2014), *Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes*. Construction and Building Materials, 62(1):79-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.20114.03.015>
- Chung, S-Y., Elrahman, M. A., Kim, J-S., Han, T-S., Stephan, D., Sikora, P. (2019), *Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations*. Construction and Building Materials. 211(1):988-999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.270>
- Dong, Y., Su, C., Qiao, P., Sun, L. (2020), *Microstructural crack segmentation of three-dimensional concrete images based on deep convolutional neural networks*. Construction and Building Materials. 253(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119185>
- Dong, W., Huang, Y., Lehane, B., Ma, G. (2020), *XGBoost algorithm-based prediction of concrete electrical resistivity for structural health monitoring*. Automation in Construction. 114(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103155>
- Du, F., Jin, Z., She, W., Xiong, C., Feng, G., Fan, J. (2020), *Chloride ions migration and induced reinforcement corrosion in concrete with cracks: a comparative study of current acceleration and natural marine exposure*. Construction and Building Materials. 263(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120099>
- Green, W. K. (2020), *Steel reinforcement corrosion in concrete – an overview of some fundamentals*. Corrosion Engineering, Science and Technology. 55(4):289-302. <http://dx.doi.org/10.1080/1478422x.2020.1746039>
- Han, W., Lee, J. S., Byun, Y. H (2021), *Volume, strength, and stiffness characteristics of expandable foam grout*. Construction and Building Materials. 274(1):1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122013>
- He, T., XU, R., Chen, C., Yang, L., Yang, R., Yongqi, D. (2018), *Carbonation modeling analysis on carbonation behavior of sand autoclaved aerated concrete*. Construction and Building Materials. 189(1):102-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.199>
- He, X., Zheng, z., Yang, J., Su, Y., Wang, T., Strnadel, B. (2019), *Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials*. Journal of Cleaner Production. 19(2):2-49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119455>
- Hou, L., Li, J., Lu, Z., Niu, Y. (2021), *Influence of foaming agent on cement and foam concrete*. Construction and Building Materials. 280(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399>
- Kanellopoulos, A., Savva, P., Petrou, M. F., Ioannou, I., Pantazopoulou, S. (2020), *Assessing the quality of concrete – reinforcement interface in Self Compacting Concrete*. Construction and Building Materials. 240(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117933>
- Khodabakhshian, A., Brito, J., Ghalehnavi, M., Shamsabadi, E. A. (2018), *Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder*. Construction and Building Materials. 169(1):237-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>
- Kashani, A., Ngo, T. D., Mendis, P., Black, K. R., Hajimohammadi, A. (2017), *A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete*. Journal of Cleaner Production. 17(3):1-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>
- Liu, X., Ni, C., Meng, K., Zhang, L., Liu, D., Sun, L. (2020), *Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash*. Construction and Building Materials. 251(1):1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118954>

- Liu, X., Sun, D., Liu, D., Meng, K., Ni, C., Shao, Z., Sun, L. (2021), *Simulation of ultrasonic propagation in porous cellular concrete materials*. Construction and Building Materials. 285(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122852>
- Lynch, J. P., Farrar, C. R., Michaels, J. E. (2016), *Structural health monitoring: technological advances to practical implementations*. Proceedings of the Ieee. 104(8):1508-1512. <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2016.2588818>
- Lokeshwari, M., Bandakli, B. R. P., Tarun, S. R., Sachin, P., Kumar, V. (2021), *A review on self-curing concrete*. Materials Today: Proceedings. 1(1):1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.859>
- Mariz, J. C. (2013), “*Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado*”. Monograph presented as a partial requirement for Bachelor's degree in Civil Engineering from the Polytechnic School of Pernambuco – University of Pernambuco.
- Mechtcherine, V., Michel, A., Liebscher, M., Schneider, K., Großmann, C. (2020), *Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: material and automation perspectives*. Automation in Construction. 110(1):1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103002>
- Michel, A., Sørensen, H. E., Geiker, M. R. (2021), *5 years of in situ reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element*. Construction and Building Materials. 285(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122923>
- Namkung, H., Lee, Y-J., Park, J-H., Song, G-D., Choi, J W., Kim, J-G., Park, S-J., Park, J C., Kim, H-T., Choi, Y-C. (2019), *Influence of herbaceous biomass ash pre-treated by alkali metal leaching on the agglomeration/sintering and corrosion behaviors*. Energy. 187(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.115950>
- Nascimento, C. F. G., Silva, T. M., Teixeira, I. A. R., Silva, F. G. A., Neves, D. C. M., Pedrosa, P. G. V., Valões, D. C. P., Monteiro, E. C. B. (2021), *Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto armado frente a corrosão de armadura desencadeada por carbonatação acelerada*. Conjecturas, 21(4):569-599. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-237-801>
- Nguyen, Q. D., Castel, A. (2020), *Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete*. Cement And Concrete Research. 132(1):1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106051>
- Pachla, E. C., Silva, D. B., Stein, K. J., Marangon, E., Chong, W. (2021), *Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites*. Construction and Building Materials. 283(1):1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>
- RILEM TC 154-EMC. Recommendations of RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures*. ISSN: 1359-5997. RILEM Publications SARL. Vol 36, 2003.
- Sanchez, J., Andrade, C., Torres, J., Rebolledo, N., Fulla, J. (2016), *Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements*. Materials and Structures. 50(1):1-10. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0884-7>
- She, W., Zhao, G., Cai, D., Jiang, J., Cao, X. (2018), *Numerical study on the effect of pore shapes on the thermal behaviors of cellular concrete*. Construction and Building Materials. 163(1):113-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.108>
- Shon, C. S., Lee, D., Kim, J. H., Chung, C. W. (2018), *Freezing and thawing resistance of cellular concrete containing binary and ternary cementitious mixtures*. Construction and Building Materials. 168(1):73-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.117>
- Stumm, A., schweike U., Stemmermann, P. (2018), *Nanostructured high insulating autoclaved aerated concrete*. Mauerwerk. 22(5):329-334. <http://dx.doi.org/10.1002/dama.201800024>

- Trong, L. N., Asamoto, S., Matsui, k. (2018), *Sorption isotherm and length change behavior of autoclaved aerated concrete*. Cement and Concrete Composites. 94(1):136-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.003>
- Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., Huang, T. (2017), *Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes*. Construction and Building Materials, 140(1):173-183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>
- Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C. (2020), *A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment*. Cement and Concrete Composites, 113(1):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., Sun, B. (2020), *Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete*. Construction and Building Materials, 241(1):1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Deng, G., Wei, P. (2020), *Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores*. Construction and Building Materials. 235(1):1-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117508>

Uso prático do fator de segurança na estratégia de reparo de pilares de um edifício de concreto com valor histórico

J. A. Briceño-Mena¹ , P. Castro-Borges^{1*} 

* Autor de Contato: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

Recepção: 09/11/2021 | Aceitação: 21/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação prática do fator de segurança (FS) na estratégia de reparo de pilares em um edifício de concreto armado com valor histórico (quase 70 anos). Cerca de 80% de um prédio localizado no centro histórico da cidade de Campeche, no México, declarado Patrimônio da Humanidade pela UNESCO, foi reformado. Estratégias foram utilizadas para um melhor aproveitamento dos recursos materiais, equipamentos e mão de obra na reparação de paredes, pilares, lajes e vigas. Uma das estratégias foi utilizar o FS teórico para calcular a profundidade de reparo sem consequências estruturais, mas cumprindo o propósito de controlar a carbonatação do concreto, e manter a previsão de vida útil desejada.

Palavras-chave: reparo; concreto armado; durabilidade; fator de segurança.

Citar como: Briceño-Mena, J. A., Castro-Borges, P. (2022), “Uso prático do fator de segurança na estratégia de reparo de pilares de um edifício de concreto com valor histórico”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 98 – 109, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.569>

¹ Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J.A. Briceño-Mena contribuiu com a atividade de experimentação de campo (60%), coleta de dados (50%), redação do trabalho (50%), discussão dos resultados (50%); o autor P. Castro-Borges contribuiu com a ideia original, experimentação de campo (40%), coleta de dados (50%), redação do trabalho (50%), discussão dos resultados (50%).

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Practical use of the safety factor in the column repair strategy of a concrete building with historical value

ABSTRACT

In this paper the practical use of the safety factor (FS) in the column repair strategy of a reinforced concrete building with historical value (almost 70 years) is presented. 80% of a building located in the historic center of the city of Campeche, Mexico, declared a World Heritage Site by UNESCO, was repaired. Strategies were used for a better use of material resources, equipment, and labor in the repair of walls, columns, slabs, and beams. One of the strategies was to use the theoretical FS to calculate the repair depth without structural consequences but fulfilling the purpose of controlling the carbonation of the concrete and maintaining the desired prediction of service life.

Keywords: repair; reinforced concrete; durability; security factor.

Uso práctico del factor de seguridad en la estrategia de reparación de columnas de un edificio de concreto con valor histórico

RESUMEN

En este trabajo se presenta el uso práctico del factor de seguridad (FS) en la estrategia de reparación de columnas en un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años). Se llevó a cabo la reparación del 80% de un edificio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Campeche, México, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Se utilizaron estrategias para una mejor utilización de los recursos materiales, equipamiento y mano de obra en la reparación de muros, columnas, losas y trabes. Una de las estrategias fue usar el FS teórico para calcular la profundidad de reparación sin consecuencias estructurales, pero cumpliendo la finalidad de controlar la carbonatación del concreto, y manteniendo la predicción deseada de vida de servicio.

Palabras clave: reparación; concreto reforzado; durabilidad; factor de seguridad.

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

Um dos problemas comuns em reparos de estruturas de concreto é o uso indevido de especificações estruturais para saber a profundidade da intervenção, quando se depara com problemas devido a cloretos ou carbonatação. Isso resulta em um uso mal otimizado de mão de obra, equipamentos e materiais que leva, não só a reparos errados e o retorno do problema, mas também à falta de sustentabilidade em todo o processo.

Pretendia-se a demolição e posterior construção de um novo edifício de 4 pisos, considerando que este edifício tem uma área interna de mais de 600 m² e uma altura aproximada de 20 m. No entanto, este plano foi reconsiderado porque o edifício em questão tinha aproximadamente 70 anos e estava localizado no centro histórico da cidade de San Francisco de Campeche, Campeche, México (Fig. 1), declarado Patrimônio da Humanidade, em 1999 pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). Este local é protegido por autoridades federais como o Instituto Nacional de Belas Artes e Literatura (INBAL) e o Instituto Nacional de Antropologia e História (INAH). Portanto, ao invés de um processo de demolição, teve que ser considerada uma estratégia de reparo que atendesse às condições estabelecidas pelo poder público federal, onde o máximo possível da estrutura fosse preservado (80%). Por esse motivo, foi realizado um amplo estudo sobre a durabilidade do imóvel. Em consequência, foram definidas as partes que permaneceriam de pé antes de uma intervenção que envolvesse a reparação e/ou reforço dos diferentes elementos estruturais, evitando os processos iniciais de demolição e adaptando-se às condições exigidas. Foi proposta a anexação de uma nova estrutura internamente ao edifício já recuperado, mantendo assim a sua arquitetura exterior e modernizando as áreas interiores, num processo também conhecido por retrofit.

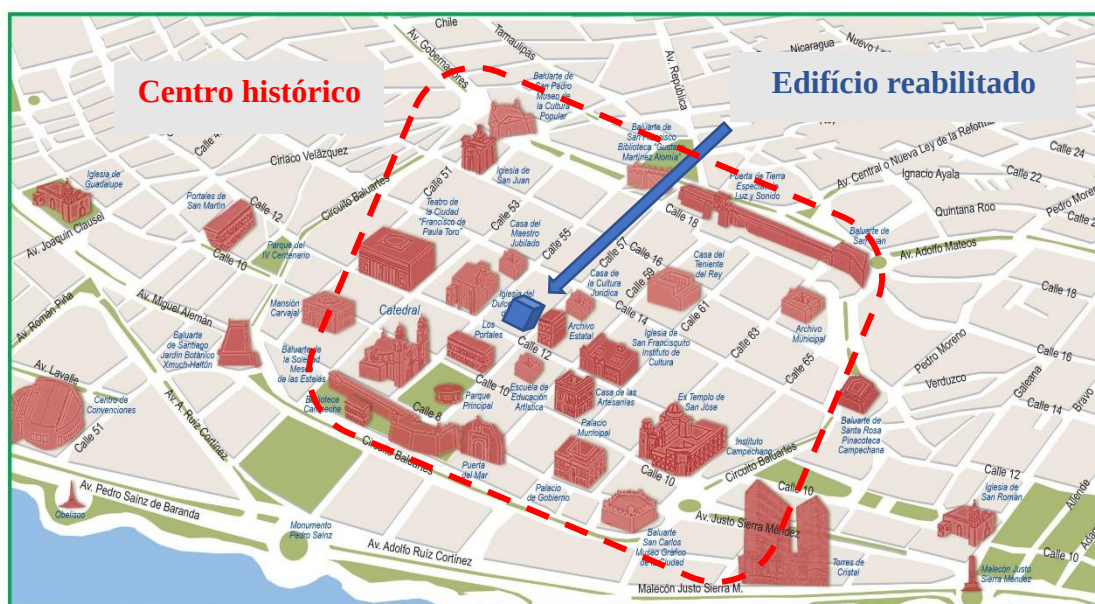


Figura 1. Localização da estrutura dentro da área protegida de Campeche¹

A estrutura em questão tinha como função primordial e inicial ser um cinema, posteriormente funcionou como estacionamento e foi finalmente abandonada. Essas mudanças no uso e abandono foram fatores que potencializaram os danos, conforme parcialmente observado nas fotos da Fig. 2.



Figura 2. Estado da estrutura antes de ocorrer a intervenção

De forma a desenvolver uma ótima reparação, deve ser considerada uma análise estrutural em que sejam considerados os processos construtivos a realizar durante a referida intervenção, visto que, durante este processo, podem ser adicionadas ou retiradas cargas devido à demolição de elementos, vibrações, alterações nas mesmas propriedades dos materiais de reparo, mudanças na resistência, escoramento, entre outros (Ministerio de Vivienda y Urbanismo – Minvu, 2018; Allen, 1991). Portanto, é importante estabelecer os valores com os quais ele irá trabalhar, quais as antigas e novas resistências dos elementos, fquais atores de segurança, entre outros. No presente trabalho é demonstrado, para o caso dos pilares, como foi utilizado o fator de segurança (FS) para a reforma do antigo cinema Selem.

1.1 O fator de segurança como critério para a durabilidade do reparo

Na literatura pode-se encontrar informações sobre a Teoria da Segurança (González Cueto Vila e Quevedo Sotolongo, 2007) que, em geral, consiste em relacionar o nível de segurança (H) (1), definido como $H = 1 - pf$, onde pf é a probabilidade de falha. Este nível de segurança depende de todas as variáveis que intervêm no projeto da estrutura e como podem variar. A equação geral que rege a teoria da segurança é:

$$H \geq H^n \quad (1)$$

Onde: H^n é o nível de segurança do projeto

H é o nível de segurança da obra

Na Engenharia Civil, pode ser entendido como segurança evitar que a estrutura ultrapasse o estado limite ultimo e o de serviço, prescritos em normas, que é onde se considera que o comportamento estrutural é aceitável (Ridell e Hidalgo, 2010). FS é aquele que relaciona a carga ou tensão (C) a ser aplicada à estrutura com a capacidade máxima (R) que ela pode suportar, ou seja, sua resistência

máxima.

$$FS = \frac{C}{R} \quad (2)$$

O FS é considerado no momento em que um elemento estrutural está sendo projetado, mas também deve ser levado em consideração na hora de realizar reparos, pois há uma relação direta com a resistência do próprio material, bem como nas dimensões da seção dos elementos. O FS é baseado em dois coeficientes (ACI 318-19, 2019), um coeficiente de aumento de carga que consiste em aumentar ficticiamente a carga que será aplicada à estrutura quando esta for submetida a cargas reais durante o uso (chamado no Brasil com a notação γ_F , coeficiente de majoração de ações). Ou seja, multiplique a carga real esperada por um fator de segurança de carga aumentado. O outro coeficiente é a redução da resistência do material que compõe o elemento. A resistência dos materiais é reduzida em comparação com as tensões máximas permitidas. Ou seja, dividindo a resistência dos materiais por um fator de segurança que reduz a resistência (conhecido no Brasil com a notação γ_C , coeficiente de minoração da resistência do concreto). Portanto, considerando um elemento que em teoria terá cargas maiores que as reais e com uma resistência menor que a sua, haverá confiança na segurança que o elemento proporciona mesmo em condições muito desfavoráveis ao longo de sua vida útil.

Colocando um exemplo prático fictício, o FS pode ser entendido da seguinte forma: Supondo que você tenha um pilar, que foi projetado para suportar 6 toneladas de carga e 2 vigas irão repousar sobre ele, e cada uma delas irá transferir uma carga de 2 toneladas para o pilar. Portanto, pode-se observar que nosso FS é 1,5 ($FS = 6/4 = 1,5$). Embora neste exemplo tenha sido tratado como um assunto simples, na realidade é algo muito mais complexo. Vários critérios devem ser considerados, como cargas vivas (as pessoas que irão utilizar o edifício), cargas mortas (móveis, por exemplo), cargas acidentais, cargas permanentes e peso próprio, além de fatores ambientais.

2. METODOLOGIA DO PROCESSO DE REPARO

2.1 Inspeção de danos

Antes de realizar qualquer intervenção na estrutura, foi necessária a realização de uma inspeção dos danos, com base na regulamentação mexicana (NMX-C-505-ONNCCE, 2016; NMX-C-520-ONNCCE, 2018), a fim de estabelecer as estratégias de reparo. Essas inspeções já foram publicadas (Briceño-Mena et al, 2021) e podem ser consultadas na literatura para mais detalhes.

Neste caso, essas inspeções tiveram 4 eixos principais:

1. Visual, para ser capaz de identificar as áreas danificadas que requerem uma maior intervenção e possíveis causas de problemas patológicos como áreas com umidade, bem como destacamentos, fissuras, corrosão de armaduras, etc.
2. Mecânica, para conhecer o estado do concreto e do aço, como, por exemplo, sua resistência mecânica e, a partir dela, poder estabelecer a resistência do novo concreto a ser utilizado.
3. Eletroquímica, para saber o estado do aço, quão danificado pode estar devido a problemas patológicos.
4. Química, para determinar os agentes agressores que estão causando danos aos elementos estruturais.

2.2 Estratégias de reparo

Após a vistoria efetuada, constatou-se que os elementos estruturais e arquitetônicos poderiam ser aproveitados para a sua consolidação com a nova estrutura a ser construída no interior do edifício no âmbito da sua mudança de uso. Todas as estratégias de reparo foram estabelecidas de forma a

poder dotar a estrutura de uma nova vida útil e durabilidade contra os problemas patológicos atuais e futuros a que possa estar sujeita, considerando as características mecânicas dos próprios elementos, bem como o uso dos fatores de segurança (NMX-C-530-ONNCCE, 2018; Val e Stewart, 2002; Melchers, 2001). Por sua vez, essas estratégias foram baseadas em experiências anteriores e na literatura como o manual Rehabilitar (Helene & Pereira, 2003). O objetivo dessas reparações era remover o concreto danificado ou que apresentasse algum problema patológico como a carbonatação, bem como garantir a estabilidade estrutural com o recálculo e reestruturação da quantidade de aço necessária nos elementos, além de garantir o revestimento adequado de acordo com os requisitos estruturais. A Fig. 3 mostra os processos de deterioração da estrutura. Para definir as estratégias de reparo, foi necessário estabelecer os tipos de reparo a serem utilizados:



Figura. 3. Carbonatação e desprendimento de concreto

2.2.1 Reparo de superfície localizado (RSL).

Este reparo refere-se àqueles elementos que apresentam danos ao concreto com pouca profundidade e extensão em relação às dimensões do elemento estrutural. Portanto, foi estabelecido um reparo em áreas específicas onde se observam fissuras em profundidade não superior a 3 cm ou antes de atingir a armadura.

2.2.2 Reparo de superfície uniforme (RSU).

Esta estratégia de reparo é semelhante ao reparo superficial localizado, pois será realizado em profundidade não superior a 3 cm, ou antes de atingir a armadura, mas contemplando o reparo em extensão relativamente grande de acordo com as dimensões do elemento estrutural, delimitando para as obras uma extensão máxima no elemento de 1,5 m.

2.2.3 Reparo profundo localizado (RPL).

Esta reparação será efetuada nos elementos estruturais onde se identificou avaria de grande extensão em relação às dimensões do elemento estrutural, sendo a sua profundidade superior a 3 cm, afetando o concreto por detrás das armaduras.

2.2.4 Reparo profundo uniforme (RPU).

Como na seção de reparo profundo localizado, o reparo é executado em uma profundidade além do aço. Porém, por ser uniforme, o reparo foi estabelecido em seções máximas de 1,5 m, devido a problemas estruturais.

3. ABORDAGEM E USO DO FATOR DE SEGURANÇA EM REPAROS

As técnicas de reparo propostas foram realizadas com o objetivo de aplicar ferramentas nos processos construtivos que permitam evitar processos desnecessários como demolições, que levariam à geração de entulho e lixo e ainda mais em áreas importantes como patrimônio mundial. Como ponto de partida inicial para a realização da reparação, foi importante analisar cada elemento individualmente, o seu comportamento, a sua carga máxima de suporte, o seu estado, e posteriormente projetá-lo a um nível geral relacionando-o com todos os elementos estruturais, obtendo-se assim um comportamento global. Desta forma, foi possível realizar a intervenção considerando todos os possíveis fatores de afetação e minimizando os danos colaterais do processo de reparação. Isso, por sua vez, leva ao treinamento de pessoal para preparação de reparos, uma vez que, atualmente, tanto os trabalhadores quanto os engenheiros desconhecem essas questões, o que acarreta o uso incorreto de ferramentas, materiais e equipamentos.

Embora uma estratégia de reparo possa ser executada por pessoas treinadas, é sempre importante levar em consideração a segurança e os fatores de risco ao trabalhar.

A teoria do FS foi colocada em prática no processo de reparo da estrutura descrita neste trabalho. Para isso, foi necessário o apoio de manuais, regulamentos, literatura e experiência própria para estabelecer com os melhores critérios a estratégia ideal por elemento. Conforme mencionado anteriormente, graças à inspeção anterior, foi possível estabelecer o grau de dano e com ele a estratégia de reparo. Embora 4 possíveis tenham sido estabelecidos, neste trabalho apenas o que está relacionado ao reparo profundo uniforme será discutido (ver Fig. 4)

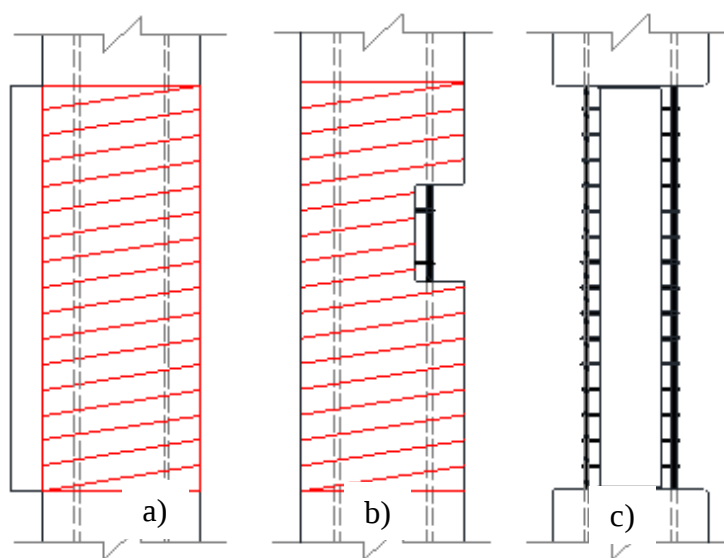


Figura 4. Reparo profundo uniforme: a) Delimitação da área a ser demolida, b) início da escarificação, c) seção final após escarificação

Para a realização das reparações, foi necessário estabelecer os critérios com que seriam realizadas. No caso desta estrutura, existiam elementos de diferentes dimensões, para os quais foram estabelecidos critérios universais de reparação, mas deviam ser verificados antes da sua execução. Um RPU pode ou não ser grande em relação ao tamanho do elemento. Porém, neste caso e para não recorrer a materiais, mão-de-obra e tempo como é o caso da instalação das escoras de estabilização, determinou-se pela praticidade que o melhor era efetuar as reparações em seções de 1,5 metros lineares. A seguir está um exemplo de um pilar do tipo retangular. O pilar típico (ver Fig. 5) tinha seção transversal de 30x35 cm e com o auxílio dos ensaios mecânicos realizados foi possível obter a resistência média à compressão do concreto, que é superior a 200 kgf/cm².

Considerando a seção transversal do elemento e a resistência mínima obtida, pode-se deduzir que o pilar é capaz de suportar uma carga axial de 210 t. Agora, se o concreto em mau estado for escarificado, e for reparado além da armadura, lembrando que o reparo profundo uniforme é aquele que ocorre além de 3 cm ou atrás da armadura, a nova seção transversal do elemento é de 25x30 cm. Se for utilizada esta nova seção transversal e a resistência à compressão obtida anteriormente com os corpos de prova extraídos, pode-se determinar que a estrutura, mesmo com a redução da seção de concreto, é capaz de ainda suportar 150 t. Se for considerado que, pelo menos, o elemento foi projetado com FS de 1,5, então a estrutura foi inicialmente projetada para suportar com segurança uma carga de 140 t. Portanto, mesmo após a escarificação, o pilar a ser reparado ainda pode suportar as cargas exercidas, pois é capaz de resistir a até 150 t. Isso não poderia ser totalmente verdade, pois não se trata de uma análise que considere todos os possíveis efeitos que podem existir no momento de fazer os reparos. No entanto, é uma boa estratégia a ser realizada no campo, pois permite uma rápida apreciação de até que ponto é possível intervir sem afetar estruturalmente o elemento e poder continuar com o trabalho de reparo.

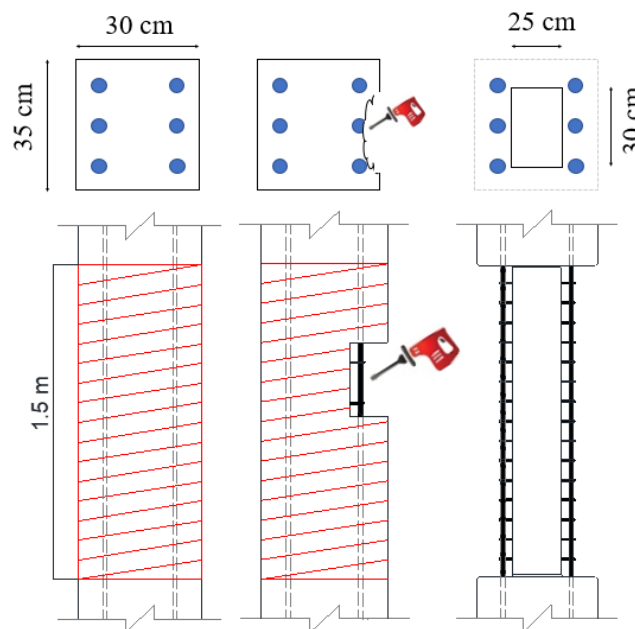


Figura. 5. Critérios para delimitação e escarificação de reparos

Para o processo de reparo, foi feito um guia que poderia ser facilmente seguido pelos trabalhadores e que por sua vez era repetível em vários elementos. Esse processo pode ser visto na Fig. 6. Para efetuar as reparações e de forma a controlar vários problemas como contrações de temperatura, módulo de elasticidade, etc., optou-se por utilizar um concreto com características semelhantes para efetuar a reparação dos elementos.



Escarificação mecânica para remover o concreto em mal estado e descobrir a armadura



Medição do diâmetro da armadura, se a perda de diâmetro foi maior que o permitido, a secção de aço deve ser reposta.



Furos foram feitos para chumbar novas armaduras complementares para compensar o perdido por corrosão. Para sua correta ancoragem, foi utilizada resina epóxi.

Antes de efetuar a concretagem, a base de todos os pilares foi impermeabilizada com produto de base asfáltica, ao redor do piso para evitar a penetração de umidade ou agentes corrosivos.



Com base em experiências anteriores de inspeção, foi recomendado aplicar um conversor de óxido ao aço.



Antes da concretagem, foi aplicada uma ponte de aderência para garantir a união do concreto novo com o antigo, que também tem a função de selador.



Após lançamento e concretagem foi aplicada cura química para garantir durabilidade

Figura. 6. Processo de reparo profundo uniforme

Naturalmente, o trabalho dos operários implicou em alguma ocasião o rompimento da seção de concreto ou a ultrapassagem da seção mínima exigida pelo FS. Nestes casos os cuidados incluíram não apenas escoramentos pontuais, mas também levar em consideração o monolitismo da estrutura na transferência das cargas excedentes do trecho contemplado para os elementos vizinhos. Com este trabalho foi possível demonstrar de forma simples a facilidade e a confiança com que um RPU em pilares pode ser abordado, levando-se em consideração um simples cálculo do FS. A Fig. 7 mostra uma visão noturna do prédio já recuperado.



Figura 7. Vista noturna do edifício após intervenção

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi apresentar o caso prático de reparo de pilares de uma estrutura de concreto armado com 70 anos, que se encontrava em estado de abandono e com previsão de sua demolição total. Por mandato das autoridades, foi realizado um estudo de durabilidade que resultou na mudança do projeto de demolição para um de reparação. Para realizar esta reparação, foi necessário consultar diferentes fontes educacionais, como experiências anteriores que levaram à criação de um manual prático para os trabalhadores. Este manual foi baseado em critérios de durabilidade e também em especificações de projeto que permitem uma operação segura. O FS desempenhou um papel importante na determinação do mecanismo de reparação, o que resultou em uma economia significativa de recursos e tempo. Com estes procedimentos de reparo projeta-se ter uma estrutura durável, capaz de cumprir a vida útil estabelecida com manutenção preventiva.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coppel SA de CV, UACAM, Cinvestav, INAH e INBA. J.A. Briceño-Mena agradece a bolsa de doutorado Conacyt.

6. REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2019), *ACI 318-19 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Primera impresión: junio 2019. ISBN 978-1-64195-060-2
- Allen, D. E. (1991), “Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 995–1004, doi: <https://doi.org/10.1139/l91-122>
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P., Pérez-López, T. (2021), “Extending the Service Life of a Historical Concrete Building”, *Materials Performance*, pp. 1–8, 2021. URL: <https://materialsperformance.com/articles/coating-linings/2021/04/extending-the-service-life-of-a-historical-concrete-building>
- González Cueto Vila, A. V., Quevedo Sotolongo G. (2007), “Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad” *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 22 No. 2, pp. 81–88, www.ing.puc.cl/ricvol. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v22n2/art02.pdf>
- Ridell C. R., Hidalgo O. P. (2010), *Diseño Estructural*, Quinta. Pontificia Universidad Católica de Chile. I.S.B.N. 956-14-0463-X
- Helene, P., Pereira, F. (2003), *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón - reparación, refuerzo y protección*. Red Rehabilitar, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), 2003.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu (2018), Vol. 4. *Manual De Reparaciones Y Refuerzos*

Estructurales. Editor: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional – Ditec, Minvu, ISBN: 978-956-9432-85-9. Gobierno de Chile, febrero de 2018.

Melchers, R. E. (2001), “*Assessment of existing structures—approaches and research needs*” J. Struct. Eng., vol. 127, no. 4, pp. 406–411, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(406\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(406))

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2016) *NMX-C-505-ONNCCE, Industria de la Construcción – Inspección Preliminar de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad - Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018), *NMX-C-520-ONNCCE, Industria de la Construcción-Inspección Detallada de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad-Procedimientos*.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. (2018) *NMX-C-530-ONNCCE, Industria de la construcción – Durabilidad – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Criterios y Especificaciones*.

Val, D. V., Stewart, M. G. (2002), “*Safety Factors for Assessment of Existing Structures*,” J. Struct. Eng., vol. 128, no. 2, pp. 258–265, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:2\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(258))

Estudo termográfico das manifestações patológicas devidas à umidade e do estado de conservação da cobertura da Basílica de Santa Maria

D. Bru^{1*} , S. Ivorra¹ 

* Autor de Contato: david.bru@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.567>

Recepção: 01/11/2021 | Aceitação: 13/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este trabalho analisa o estado atual da cobertura da Basílica de Santa María, Alicante, Espanha. Este edifício data do século XIII e está catalogado. Para a análise das eflorescências observadas foi efetuada uma análise da tipologia da construção, bem como uma análise visual do estado dela, descrevendo as manifestações patológicas existentes, tanto na zona exterior das coberturas, como na área interna dos ambientes abaixo dela. Para a análise técnica de possíveis vazamentos através da cobertura para os ambientes interiores da basílica, foi efetuado um ensaio de estanqueidade e verificação através do controle da variação de temperatura por meio de análise termográfica. O procedimento foi adequado para entender e comprovar a existência e localização de vazamentos que danificaram este edifício.

Palavras-chave: danificaram este edifício.

Palavras-chave: termografia.

Citar como: Bru, D., Ivorra, S. (2022), “*Estudo termográfico das manifestações patológicas devidas à umidade e do estado de conservação da cobertura da Basílica de Santa Maria*”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 110 – 126, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.567>

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Alicante, España.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor David Bru contribuiu 100% com a atividade de coleta de dados e experimentação, com a atividade ideia original, redação do trabalho e discussão dos resultados em 50%. O autor Salvador Ivorra contribuiu com a atividade de ideia original, redação do trabalho e discussão dos resultados em 50%.

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

Thermographic study of the pathological manifestations due to humidity and of the conservation state of the Santa Maria Basilica's roof

ABSTRACT

This paper analyzes the current state of the roof of the Basilica of Santa Maria, Alicante, Spain. This building dates back to the 13th century and is catalogued. For the analysis of the efflorescence observed, an analysis of the constructive typology is carried out, as well as a visual analysis of the state of the same, describing the existing pathological manifestations, both in the exterior area of the roofs, as well as in the interior area of the rooms under them. For the technical analysis of the possible leaks from the roof to the interior rooms of the basilica, a watertightness test and the verification through the control of the variation of temperatures by means of thermographic analysis are carried out. It can be concluded the existence and position of leaks that have damaged this listed building.

Keywords: thermography, humidities, filtrations, efflorescence, historical building.

Estudio termográfico de las manifestaciones patológicas por humedades y del estado de conservación de la cubierta de la Basílica de Santa María

RESUMEN

El presente trabajo analiza el estado actual de la cubierta de la Basílica de Santa María, Alicante, España. Este edificio data del siglo XIII y está catalogado. Para el análisis de las eflorescencias que se observan se realiza un análisis de la tipología constructiva, así como un análisis visual del estado de las mismas, describiendo las manifestaciones patológicas existentes, tanto en la zona exterior de las cubiertas, como en la zona interior de las salas bajo las mismas. Para el análisis técnico de las posibles filtraciones de la cubierta a las salas interiores de la basílica se realiza una prueba de estanquidad y la verificación a través del control de la variación de temperaturas mediante análisis termográfico. Se puede concluir la existencia y posición de filtraciones que han dañado este edificio catalogado.

Palabras clave: termografía, humedades, filtraciones, eflorescencias, edificio histórico.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é a avaliação técnica das manifestações patológicas atuais do sistema de impermeabilização da cobertura da Basílica de Santa Maria, Alicante, Espanha, Figura 1. A Basílica de Santa Maria, localizada nas coordenadas 38°20'46"N 0°28'45"W e a menos de 300 m da costa, foi catalogada como um Bem de Interesse Cultural dentro dos monumentos catalogados no Patrimônio Cultural Valenciano. As partes mais antigas do edifício foram datadas entre os séculos XIII e XIV. Do ponto de vista arquitetônico, a estrutura é de nave única sem transepto, com capelas laterais localizadas entre os contrafortes e uma abside poligonal, Fig. 2. A nave principal é coberta por seis abóbadas nervuradas com arcos pontiagudos, separadas umas das outras por arcos torais, que juntamente com as nervuras partem do capitel numa solução típica do final do século XV e das primeiras décadas do século XVI (Beviá et al, 1997).



Figura 1. Vista aérea da Basílica de Santa Maria, Alicante. Sup. esquerda: fachada noroeste. Sup. direita: fachada sudeste. Abaixo: Vista plana da Basílica de Santa Maria, Alicante. Identificação das coberturas do estudo. Fonte: Imagens ©2016 Google, Dados do mapa ©2016 Google, Inst. Geogr. Nacional.

Quanto aos principais materiais que constituem os elementos de alvenaria da Basílica de Santa Maria, não foram realizados estudos laboratoriais para identificar a sua origem. No entanto, e de acordo com os dados históricos, fornecemos na presente investigação os dados associados às rochas da mesma origem dispostas nos Palácios Cívicos da Rua Gravina (Louis et al. 2001), próximo ao local da Basílica. Os dados obtidos nesta pesquisa permitem classificar a tipologia da rocha utilizada, sua resistência à compressão e coeficiente de absorção. Nesse sentido, a rocha é constituída por uma biocalcarenita com granulometria variável, desde areia média a grossa e até

conglomerado (>2mm), com alta porosidade e resistência à compressão de 6,1 MPa. Por outro lado, em relação ao coeficiente de absorção, são apresentados valores entre 6% e 15%. Nesse sentido, é importante destacar o alto valor de absorção das mesmas em comparação com outras pedras do tipo calcário ou margá, com valores entre 0,56% e 2,05% (Thomas et al. 2008). Outros dados associados ao conteúdo de calcita e densidade deste material são mostrados na Tabela 1.

Por fim, Louis et al (2001), também destacam um aspecto importante para a análise de manifestações patológicas devido à presença de umidade neste tipo de materiais. Especificamente, avaliam a presença de eflorescências e destacam o efeito altamente prejudicial da cristalização de sal no processo de erosão alveolar e principalmente em áreas com fachadas expostas ao vento marinho, visto que este efeito favorece a cristalização de sais e contribui com grande quantidade de sal marinho devido ao efeito do respingo de maré. Essas afirmações são confirmadas pela presença de halita na eflorescência no interior da estrutura. Além disso, mostram que parte do cloreto de sódio do meio marinho ou da água de infiltração atingiu parte do edifício analisado devido a fenômenos de capilaridade. Portanto, com base nos resultados anteriores de Louis et al (2001), pode-se confirmar a hipótese da presença de sais nos materiais constituintes da Basílica analisada.

Tabela 1. Dados de composição e algumas propriedades físicas da Pedra San Julián (Brotóns et al. 2013).

Pedra San Julián	Pedreira	Edifícios
Calcita (%)	80-85	65-85
Absorção de água (%)	7.6-15.1	6.2-13.0
Massa específica absoluta (g/cm ³)	2.64-2.67	2.59
Massa específica unitária (g/cm ³)	1.85-2.29	1.8-2.4

O edifício analisado neste estudo enquadra-se nas tipologias de construções históricas, sendo a sua abordagem construtiva muito diferente das edificações da atualidade. Do ponto de vista higrotérmico, sua principal diferença é a sua concepção como um edifício permeável à água (na forma de vapor ou líquido), tanto do exterior como do interior (Paricio, 1985), ao contrário dos edifícios atuais que são concebidos como elementos isolados, para evitar a perda de energia para o exterior. Esquemáticamente, o edifício estudado, conforme referido no ponto 1, apresenta um recinto perimetral que se estima (com os meios disponíveis) ter uma chapa de grande espessura. Este fato faz com que, frente à ação da água externa, a parte externa da folha em contato com a água se molhe e difunda a água na forma líquida através da espessura da parede. O avanço da água através da parede forma uma "frente úmida" até que cesse a precipitação. Esta quantidade de água permanece absorvida na alvenaria devido à elevada capacidade de absorção dos materiais constituintes da alvenaria e depois evapora nas duas faces da parede. Portanto, é possível intuir a importância da espessura e permeabilidade do material, a fim de evitar que a frente úmida apareça no interior da sala e, sobretudo, para que uma vez terminada a fonte de umidade, a água evapore no menor tempo possível, especialmente para evitar a sobreposição de frentes úmidas entre diferentes ciclos de precipitação. Portanto, também é claro que a evacuação da água neste tipo de edifício ocorre de forma diferida por difusão e evaporação. Portanto, é comum observar neste tipo de construção processos de saturação do revestimento pela água da chuva, uma vez que os poros estão saturados, e processos de escoamento superficial ao longo do revestimento, produzindo o umedecimento de outras áreas do elemento dispostas para o recinto da construção.

Por outro lado, em relação aos fenômenos dinâmicos da água no interior do edifício na forma de vapor, é importante notar que, devido à ausência de folhas de plástico ou barreiras de vapor como as atualmente utilizadas em coberturas e recintos modernos, o edifício foi caracterizado como eminentemente permeável. É comum que a umidade específica mínima de um ambiente seja a mesma do exterior, pois o ar pode penetrar do exterior sem ser submetido a nenhum processo de

barreira. Portanto, os problemas usuais deste tipo de construção quando se deparava com a umidade em sua concepção original era tentar eliminar o excesso de vapor gerado dentro das salas devido à respiração e transpiração humana, de forma a equalizar a umidade específica dentro da sala a do lado de fora. Assim, conforme mencionado acima, se a sala não tivesse janelas ou aberturas para eliminar o excesso de vapor d'água acumulado na sala, este era eliminado por difusão pelas paredes, convecção por aberturas e fendas, ou por absorção do vapor nos materiais, que depois eram transferidos para o meio ambiente após a secagem.

Uma vez considerada a concepção técnica da abordagem dos sistemas de fechamento dos edifícios históricos, é necessário analisar as possíveis causas que geram a formação de umidade, sendo esta a principal razão da redação deste estudo. A presença de umidade pode ser decorrente de processos de infiltração por contato direto com a água ou por capilaridade. Em ambos os casos, a transferência de água através da alvenaria pode implicar no arrastamento de sais solúveis, quer da própria rocha, quer da própria infiltração. Esses sais solúveis podem ser retidos nos vazios quando a água evapora, cristalizando nos poros e causando o aparecimento de eflorescências (Giovannacci et al, 2017). A saturação dos poros devido à presença de cristalização do sal diminui os processos de evaporação e provoca um deslocamento das manchas de umidade devido à busca por novas zonas de saída do vapor d'água presente nos materiais porosos.

Por outro lado, se o acúmulo dos sais mencionados acima correspondesse a sais higroscópicos, estes tenderiam a reter água do ar quando a umidade relativa do ar ultrapassasse um determinado valor limite, o que poderia gerar um falso mecanismo de presença de umidade devido à higroscopia condensação, com possível aparecimento de manchas, mas causada simplesmente pela absorção de vapor d'água do ar devido ao efeito da higroscopicidade dos sais e não pela presença real de uma fonte de água por infiltração ou capilaridade. Por esse motivo, uma causa geral da patologia da umidade em edifícios históricos é o aparecimento de eflorescências devido a fenômenos de infiltração locais causados anos atrás que foram posteriormente reativados. Ou seja, o aparecimento de novas umidades na alvenaria não seria devido à presença real de uma nova infiltração de água, mas devido à higroscopicidade dos sais na superfície das rochas. Grossi e Esbert (Grossi e Esbert, 1994) apresentam uma profunda revisão bibliográfica sobre os efeitos dos sais solúveis na deterioração de rochas monumentais. Nesse sentido, no interior da igreja analisada, observam-se diferentes eflorescências e manchas, que sugerem a existência de infiltrações, Fig. 2.



Figura 2. Fotos dos ambientes abaixo da cobertura 2: a) Fachada leste, b) Vista inferior da cobertura, c) Vista inferior da cobertura com parede divisória em abóbada, d) Ambiente adjacente superior após divisão com parede divisória. Fotos dos ambientes sob cobertura 1: e) Vista inferior da área da cobertura próximo à fachada externa, f) Vista inferior da cobertura em contato com o corpo da igreja. As Figuras a), b), c) incluem os pontos de tomografia da Fig. 7 com um ponto vermelho.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foi efetuada uma análise visual comparativa, com base na realização de um ensaio de estanqueidade, analisando o estado dos ambientes antes e depois do processo de alagamento das coberturas, com o objetivo de detectar fugas com rápido acesso da cobertura. Por fim, foi realizada uma análise da termografia infravermelha da cobertura e dos cômodos citados, a fim de detectar a existência de pontes térmicas localizadas e áreas com presença significativa de umidade (Takeda, 2018), (Silva et al, 2019).

Para determinar as condições gerais de funcionamento da cobertura em relação as suas inclinações, o estado do sistema de impermeabilização, bem como o estado de execução dos elementos singulares, tais como bordas, junções, ralos e juntas, propôs-se realizar um ensaio de estanqueidade para observar o aparecimento ou não de umidades debaixo da cobertura ou nas paredes, prestando atenção aos pontos críticos associados aos detalhes construtivos de acordo com os regulamentos em vigor à data da impermeabilização da cobertura (NBE QB-90). O ensaio de estanqueidade consistiu no alagamento até um nível de aproximadamente 3-7 cm acima do nível de drenagem, garantindo um nível de sobrecarga suficientemente baixo para não afetar as condições de segurança estrutural da cobertura. O alagamento foi mantido por 72h, sendo os ralos lacrados com sistema de impermeabilização de plástico para evitar que o nível de água na cobertura diminuísse. Finalmente, decorrido o tempo necessário para o ensaio de estanqueidade, foram retirados os sistemas de

vedação dos ralos para manter o seu funcionamento atual.

Por outro lado, para determinar a presença de umidades e possíveis pontes térmicas, que evidenciem um funcionamento incorreto da cobertura, foi efetuado um ensaio com uma câmara termográfica modelo FLIR E30, com base no disposto na norma EN 13187:1998. Alguns exemplos publicados recentemente da aplicação desta técnica podem ser encontrados nas seguintes referências (Vijay et al, 2019), (Valluzzi et al, 2019), (Lucchi, 2018), (Ruiz Valero, et al, 2019), (Garrido et al, 2020), (Martínez-Garrido et al, 2018), (Zhang et al, 2018), (Barreira et al, 2020) and (Barbosa et al, 2021)).

O teste foi realizado durante dois dias consecutivos. Durante o primeiro dia, foi realizada a gravação térmica dos decks 1 e 2, bem como da sala abaixo da cobertura 2. Esta gravação foi realizada entre 19h45 e 20h45. Os valores máximos e mínimos variaram ao longo do dia entre 10,7 °C e 17,4 °C, registrando-se um valor no momento da coleta de dados de 15 °C externo, e 16,7 °C, com um valor de umidade relativa entre 38-40%. Por outro lado, para os dados registrados no segundo dia, 15 de janeiro, os valores máximos e mínimos de temperatura atingiram valores entre 16,6 °C e 8,7 °C, registrando-se um valor externo de 13 °C e 15,9 °C no momento da coleta de dados, com um valor de umidade relativa entre 52%. Durante este segundo dia, foram analisadas as salas do pavimento 1, bem como o edifício anexo à sala do pavimento 2. O teste consistiu na análise dos pontos críticos detectados durante as fases de inspeção visual, a fim de corroborar os resultados experimentalmente. Em relação à superfície, foi considerado um material granular com valor de emissividade de 0,95 com base na biblioteca de materiais fornecida pelo fabricante, homogêneo para todas as superfícies analisadas. Outros exemplos publicados relacionados à emissividade deste tipo de materiais podem ser encontrados em (Barreira et al, 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação à análise do fluxo de água durante o ensaio de estanqueidade, os resultados mostram que, no caso da cobertura 1, a zona superior canaliza a água perimetralmente em direção à calha através das inclinações (caimentos) estabelecidas. No caso da cobertura 1, na zona inferior, foi possível verificar que as inclinações convergem na área de drenagem. A ausência de transbordamentos impede o escoamento da água em caso de saturação do dreno devido ao acúmulo de elementos sólidos em sua entrada. Este fato facilita que o nível de água parada atinja a parede lateral da capela da Comunhão, favorecendo a entrada de água no cruzamento da saia vertical.

Em relação aos resultados da análise termográfica da cobertura 1, a Fig. 3 mostra as imagens das áreas superior e inferior da cobertura. A Fig. 3 (a) mostra uma visão geral da parte superior da cobertura. Nesta imagem, todas as possíveis manifestações patológicas anteriormente mencionadas podem ser identificadas. Em primeiro lugar, pode-se perceber como após o ensaio de estanqueidade e do despejo de água sobre parte dos vazios verticais da fachada e 10 h após o ensaio, parte da umidade é preservada devido à alta capacidade de absorção da pedra em o revestimento. Nesta imagem também pode ser visto como na área do parapeito, a água acumulou-se mais do que na área localizada apenas na área da calha. Um detalhe desta área pode ser visto na Figura 3c, onde pode-se observar não só a entrada e o acúmulo de água na área inferior, mas também a água infiltrada pelas juntas entre as peças de alvenaria. Por outro lado, deve-se observar também a mudança abrupta das características térmicas na junta entre o parapeito e a parede correspondente à proteção rígida da saia superior, Fig. 3a-3c. A junção entre os dois materiais é claramente observada e pode-se perceber como parte da água despejada do final da saia escoou pelo revestimento, ficando armazenada na área da junta, devido à ausência da correta realização do detalhe final da saia. Em relação à calha, entretanto, não foram detectados problemas de vazamento. Por outro lado, a Fig. 3b mostra um detalhe da calha para passagem das instalações. Nesta imagem, pode-se observar em verde, a parte posterior da calha, onde ficou armazenada água, devido à falta

de estanqueidade da junta e ausência de dispositivo de proteção para evitar que a água goteje pela face e vazze atrás da sarjeta. Por outro lado, a Figura 3d mostra um detalhe da falta de estanqueidade da extremidade direita do parapeito, na área de ligação da ponta da saia, do parapeito e do contraforte, marcando a área que atualmente se encontra muito deteriorada, sendo um sinal óbvio de falta de impermeabilização. Ainda em relação aos problemas de impermeabilização, pode-se observar na Fig. 3e, a ausência da impermeabilização na área de contato da saia inferior com o parapeito, bem como a presença de vegetação na área mais à direita da foto, onde está a maior temperatura. Além disso, o estado atual de impermeabilização da área danificada do peitoril pode ser avaliado por meio desta imagem. Os resultados apresentados pela termografia não mostraram a presença de problemas de estanqueidade. Por fim, as Fig. 3g-3h mostram a área represada durante o teste, onde pode-se observar claramente o processo de ascensão capilar pelo revestimento, ultrapassando claramente os 5 cm de fita impermeabilizante atualmente instalada na junção da saia com o revestimento vertical, nas áreas onde foi colocada, visto que há ausência deste detalhe construtivo em várias partes da saia inferior.

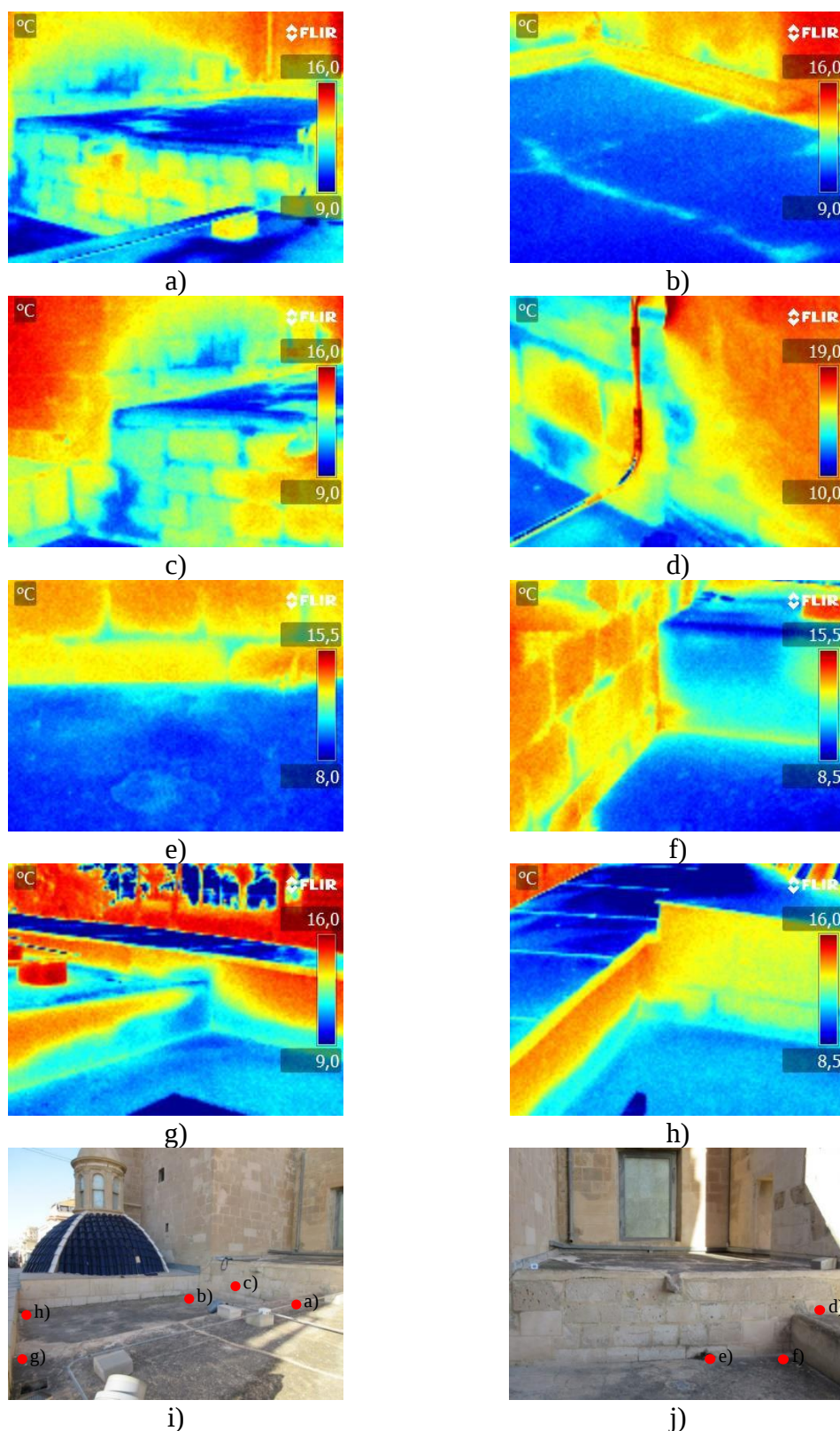


Figura 3. Termografia da cobertura 1: a) Vista geral da área superior, b) Detalhe da calha das instalações, c) Umidade na face vertical e canto do parapeito, infiltração através das juntas de alvenaria, d) Falta de estanqueidade no parapeito e contraforte, e) Saia inferior e face vertical, f) Conexão lateral da saia do parapeito, g) e h) Capilaridade, i) e j) localização dos termógrafos. Os pontos vermelhos indicam a localização da termografia na imagem associada.

Em relação aos resultados da análise da cobertura 2, as Fig. 4a e 4b mostram o detalhe da ausência da junta perimetral, mostrando a diferença de temperaturas nas áreas onde a argamassa está totalmente deteriorada, e a junta está sem argamassa entre o final da saia e do forro. É importante não confundir com a linha vermelha associada à passagem de um tubo de instalação, uma vez que a área analisada é aquela associada ao final da ligação com a face vertical da fachada. Essas imagens mostram a falta de isolamento térmico nos trechos do revestimento vertical, bem como áreas com tom mais frio, devido ao derramamento de água durante o teste de carga. As Fig. 4c e 4d mostram um detalhe desta área sem aplicação de câmera térmica. Por outro lado, a Fig. 4e mostra a zona de extremidade da saia lateral. Nesta imagem pode-se observar a falta de isolamento térmico nos trechos de face vertical, bem como áreas de tom mais frio, devido à água despejada durante o teste de carga. Esta área é mostrada em um tom mais esverdeado na área central da foto. Destaca-se também o contraste na junta da aba da saia, mostrando claramente a posição da junta horizontal entre o material superior e o material de suporte. Esta junta, representada por uma linha amarela com tons de ciano, apresenta um importante estado de deterioração, como pôde ser observado durante a análise visual da cobertura, Fig. 4g. Por fim, a Fig. 4f mostra um detalhe da extremidade perimetral da saia, na área próxima à porta de acesso a cobertura. A Fig. 4 também inclui imagens de câmeras digitais das áreas analisadas por imagens térmicas. A comparação dessas imagens permite observar os benefícios do uso da termografia na detecção de patologias, sendo esta uma técnica de apoio à inspeção visual.

Por outro lado, as Fig. 5, 6 e 7 mostram os detalhes da distribuição da temperatura no interior dos três ambientes internos analisados. Note-se que devido aos baixos níveis de diferenças térmicas entre os diferentes elementos estruturais que compõem o recinto, a nitidez das imagens não apresenta um comportamento tão diferenciado como no caso da análise das coberturas. Para aumentar o contraste térmico, em algumas salas os refletores foram mantidos acesos antes da realização do ensaio, a fim de garantir o posicionamento das bordas da sala, uma vez que as fotos térmicas foram tiradas com a luz desligada.

Analisando o comportamento térmico da sala sob a área inferior da cobertura 1, Fig. 5, referida ao longo do estudo como a sala adjacente à Capela da Comunhão, pode ser observada na Fig. 5a, correspondente ao canto de ligação entre a fachada exterior e o arco principal que dá acesso à Capela da Comunhão e, disposto na zona junto à presença de ralo na cobertura da parte superior, que seja claramente definida a diferença térmica entre a parte correspondente à fachada e a cobertura da abóbada. Porém, com as condições climáticas registadas durante o ensaio, não foi detectada a presença de irregularidades térmicas específicas nas zonas potencialmente danificadas associadas à ligação entre a fachada e o arco toral da abóbada de aresta analisada. Além disso, observa-se parte da janela externa, que serve de referência para poder enquadrar a foto. A Fig. 5b mostra um detalhe da área da janela. Nesta imagem, o efeito de ponto frio é claramente visível devido à maior transparência térmica do vidro em comparação com as altas espessuras da fachada. Além disso, nota-se a falta de isolamento térmico nas zonas de ligação entre a fachada e a cobertura, marcando claramente o bordo de junção entre os dois, e apresentando um gradiente de temperatura desde o início até à zona central da abóbada. Na Fig. 5c, é mostrada a termografia do outro canto da fachada externa, semelhante à descrita na Fig. 5a. Como se pode verificar nesta imagem não existem indícios patológicos relevantes, sendo detectado apenas o desnível térmico entre as faces verticais e a cobertura da abóbada. Finalmente, a Fig. 5d mostra uma imagem geral da cobertura. Esta imagem mostra a presença de uma parte da cobertura ligeiramente mais fria que a outra, principalmente devido ao efeito do acúmulo de água durante o ensaio.

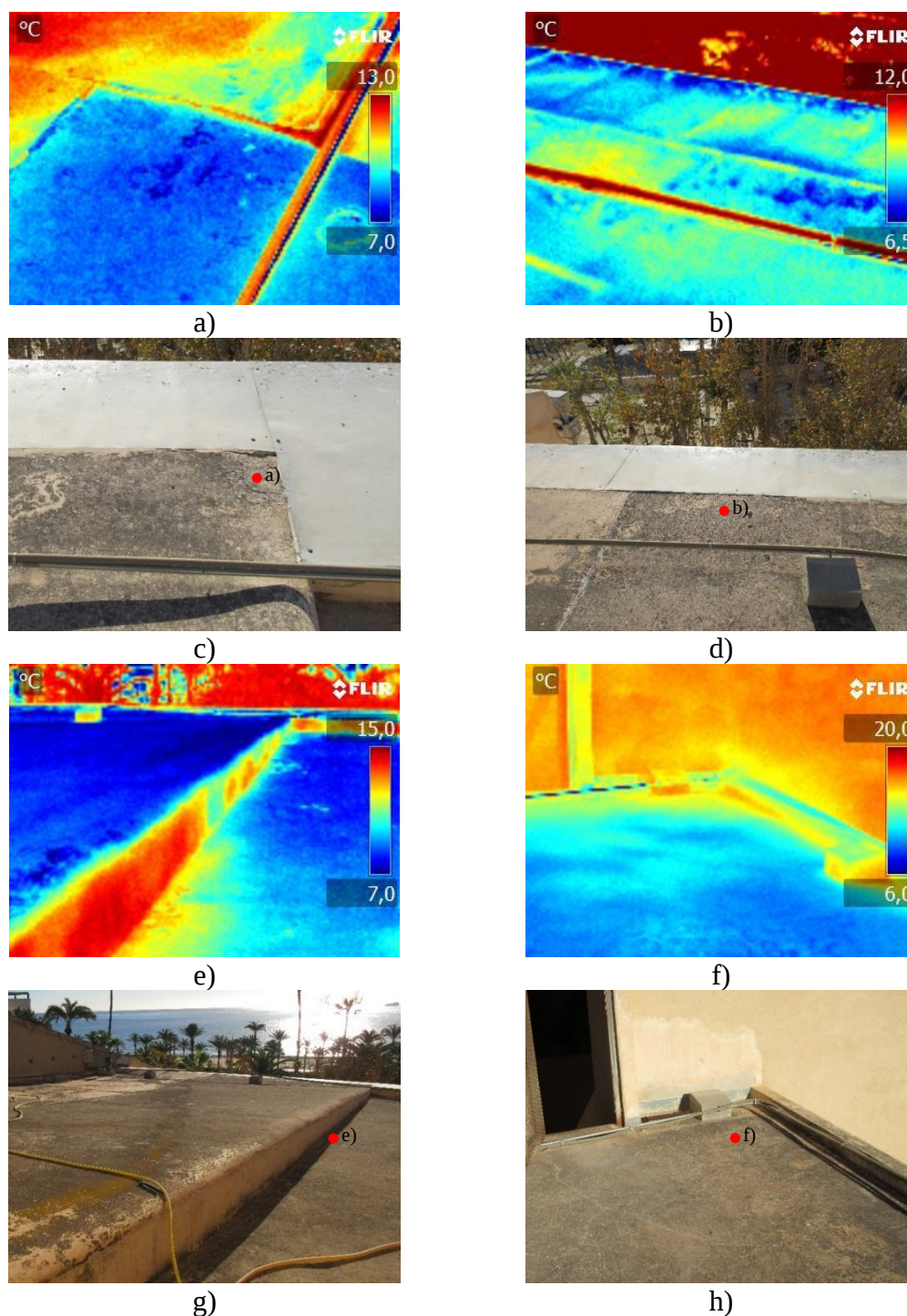


Figura 4. Termografia da cobertura 2: a) Deterioração da junta perimetral, b) Detalhe da falha na junta perimetral em contato da saia com a fachada, c) e d) Imagem a) e b) com câmera digital, e) Detalhe da extremidade lateral da saia e ligação à cobertura; f) Zona perimetral da saia na zona de acesso à cobertura; g) e h) Imagem e) e f) com câmera digital. Os pontos vermelhos indicam a localização da termografia na imagem associada.

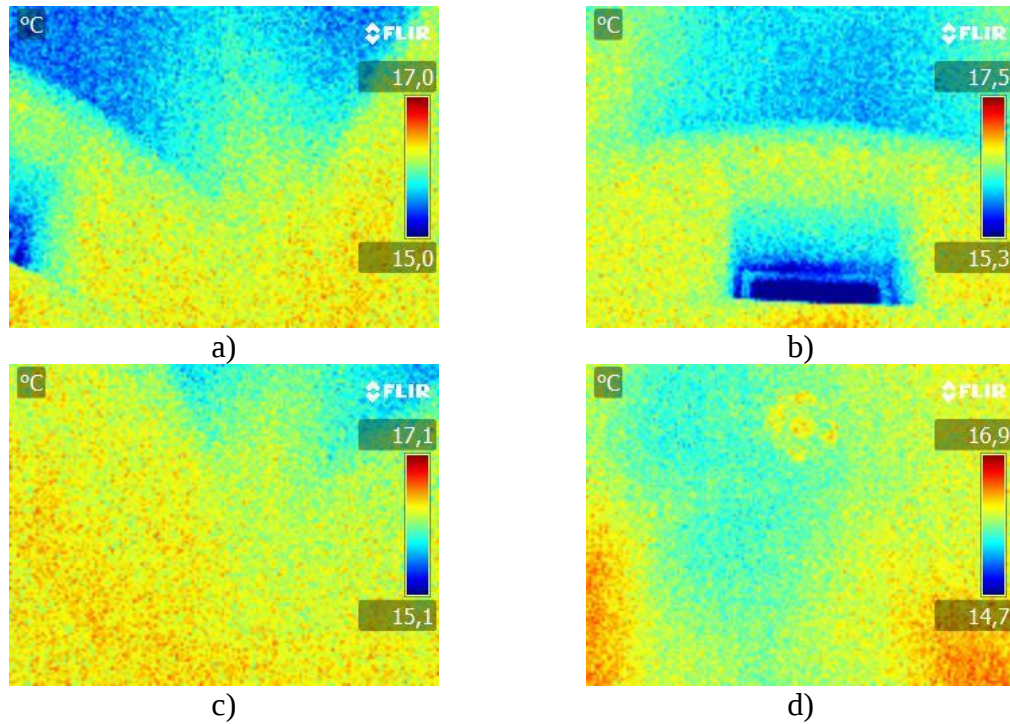


Figura 5. Termografia das salas sob a cobertura 1, adjacentes à Capela da Comunhão: a) Ligação do arco principal com a fachada exterior, na zona de acesso à Capela da Comunhão, b) Ligação da fachada com a cobertura em janela área, c) Segundo canto da parede da fachada, equivalente à imagem (a), d) Vista geral da cobertura vista de baixo.

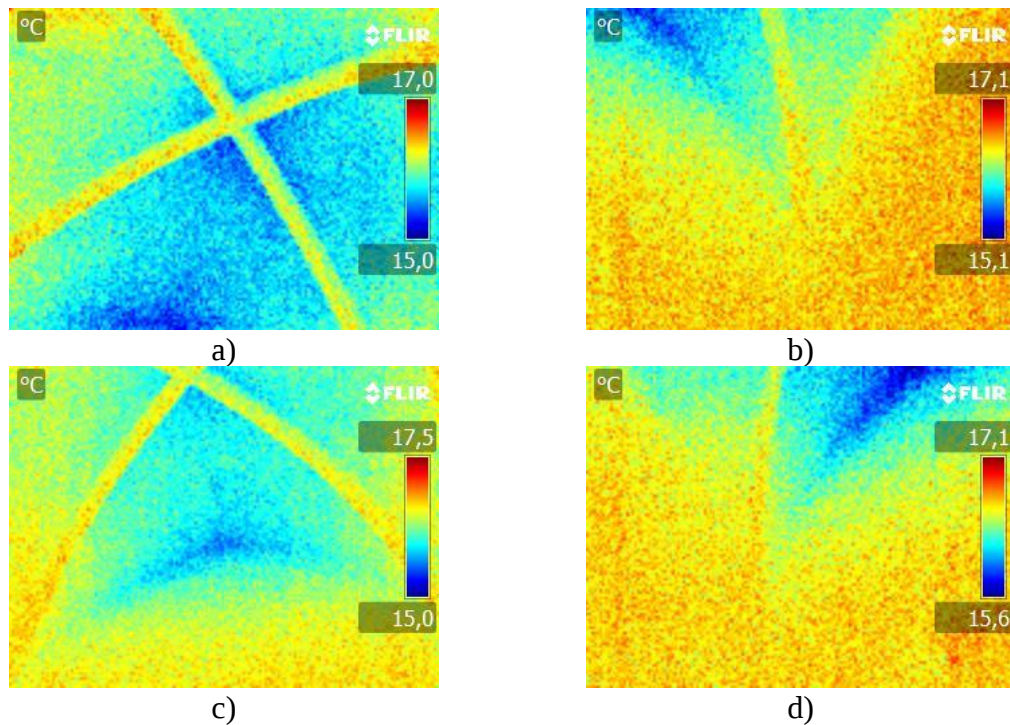


Figura 6. Termografia dos ambientes sob a cobertura 1, adjacentes ao edifício lateral: a) Vista geral do telhado, b) Ligação entre fachada e esquina lateral, c) Ligação entre fachada e a cobertura, d) Ligação entre fachada e esquina lateral oposta.

Em relação à análise por termografia realizada para a sala localizada na nave lateral, contígua à nave central da basílica, a Fig. 6 mostra a distribuição das temperaturas nos diferentes pontos críticos analisados nas seções anteriores. Em primeiro lugar, a Fig. 6a mostra uma vista inferior da cobertura em abóbada de arestas. Pode-se observar a diferença de temperaturas entre os arcos perpendiculares e o restante da laje que compõe a abóbada. Por outro lado, as Fig. 6b e 6d mostram a termografia detalhada dos cantos de conexão entre os arcos perpendiculares e as paredes da fachada. Observa-se um padrão de comportamento semelhante aos descritos para a sala anterior, com a diferença da temperatura mais elevada do início das arcadas. De referir que a análise destes pontos foi efetuada sem a presença de fontes de luz próximas antes ou durante o ensaio, pelo que a distribuição térmica se deve ao equilíbrio higrotérmico entre o exterior e o interior do edifício. Por fim, a Fig. 5c mostra o mesmo problema de falta de isolamento da sala anterior, devido à junta de ligação entre a fachada vertical e a cobertura.

Por fim, em relação à análise termográfica realizada para a sala sob a cobertura 2, a Fig. 7 mostra a distribuição das temperaturas nos diferentes pontos críticos analisados nas seções anteriores. Em geral, o comportamento térmico é muito semelhante aos detectados nas divisões anteriores, exceto que neste caso não se observou uma grande diferença térmica entre os pontos da fachada interior e a cobertura. Ou seja, as Fig. 7a, 7b, 7c e 7d mostram o detalhe do contato entre a fachada e a cobertura, mostrando os vazamentos térmicos na parte superior da área da janela, bem como na própria janela. A Fig. 7e mostra uma termografia da parte da cobertura correspondente à ancoragem do lustre, onde se observa uma distribuição uniforme das temperaturas sem a presença de danos detectados. Nas Fig. 7f e 7g, observam-se as termografias associadas às Fig. 7c e 7d, mas neste caso, na fachada oposta à externa. Nesse caso, as variações térmicas podem ser observadas nas áreas afetadas pelo aquecimento das fontes de luz. Isso se deve à presença de pontos frios nas zonas de contato entre a parede lateral e a fachada. Esses pontos frios, especialmente aqueles detectados na Fig. 7g, estão relacionados às manchas de umidade detectadas. Nessas imagens, o orifício circular mais frio é mostrado como referência para localizar a posição das fotos. É importante ressaltar que tais manchas de umidade, além de estarem relacionadas à presença de zona fria, também estão relacionadas à presença de zona de acúmulo de água na parte superior da cobertura 2, próximo à cúpula. Nesta área a água captada na cúpula é descarregada, sendo que a falta de vedação lateral na ponta da saia, aliada ao baixo nível de ventilação do ambiente mostrado, causam o aumento da umidade, e consequentemente o aparecimento de tal eflorescência.

Por fim, é de notar a presença de uma fuga detectada no edifício anexo com acesso à sala 2. Esta fuga é na cobertura do piso superior. Não foi possível detectar se a presença de umidade se deve a um erro no telhado da cobertura, ou na própria cobertura 2. Porém, devido à sua posição geométrica, está muito próximo da posição do ralo da cobertura, o que pode ser um indício da falta de estanqueidade da cobertura.

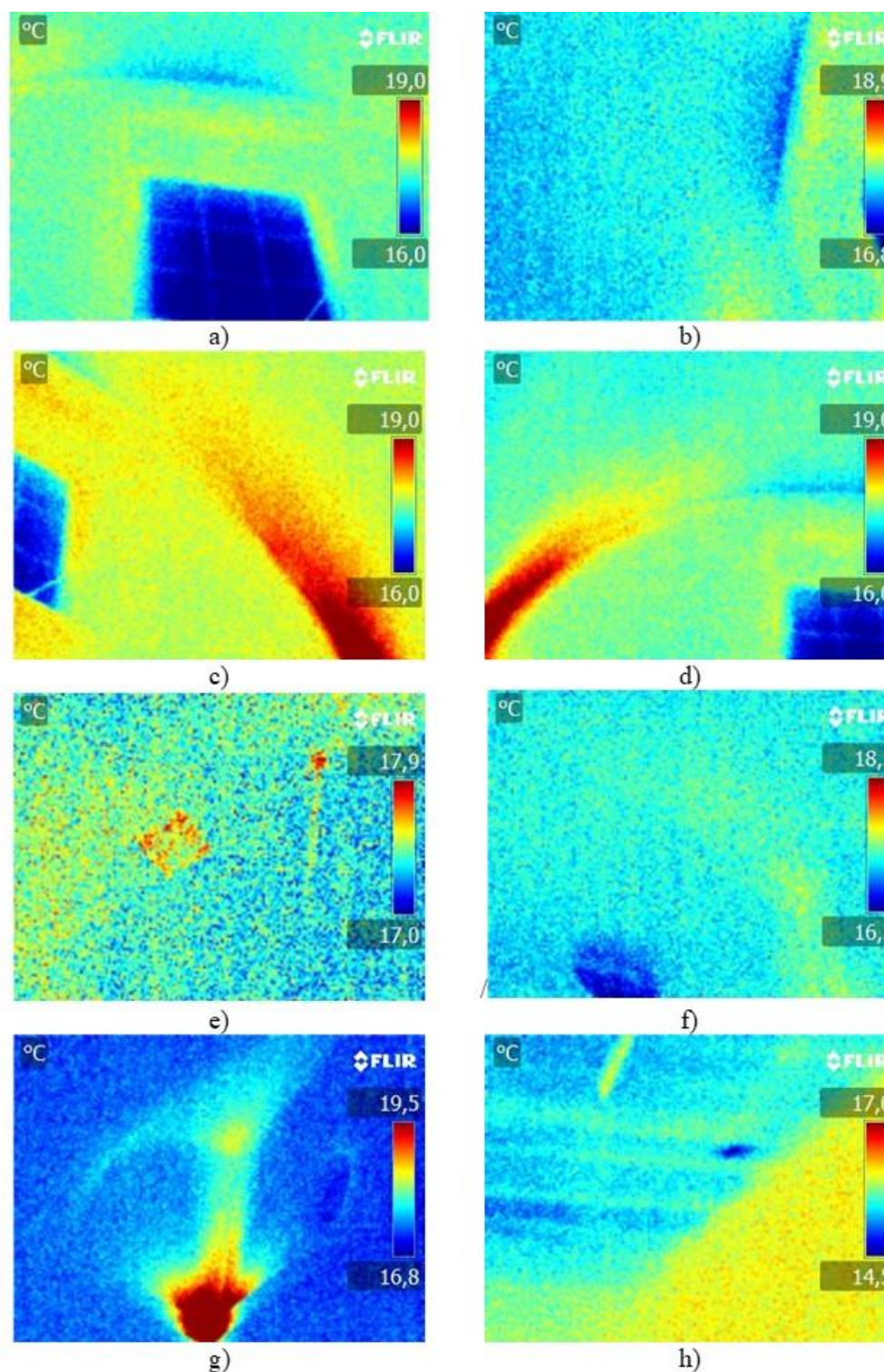


Figura 7. Termografia da sala sob a cobertura 2: a) janela e área da laje, b) vista inferior da cobertura, c) vista da conexão da parede lateral da laje, d) vista da conexão da parede lateral da laje, e) área central da cobertura, f) vista da parede divisória traseira, g) vista da conexão da parede lateral e da parede traseira, h) vazamento na área externa.

4. CONCLUSÕES

Após a realização do estudo técnico de avaliação do estado de estanqueidade e da análise das umidades das coberturas analisadas na Basílica de Santa Maria, pode-se concluir que o estado atual da cobertura não cumpre as condições técnicas mínimas com base no corrente estado dos detalhes de construção de acordo com as disposições da norma (NBE QB-90). Da mesma forma, o estado de umidade e eflorescência presente nas zonas interiores deve-se a um problema de condensação higroscópica, pois a umidade aumenta devido à proximidade com a zona marítima, bem como à falta de ventilação das divisões interiores estudadas. Além disso, esta manifestação patológica é intensificada pelos possíveis problemas de infiltração causados durante os meses de outubro e novembro, devido ao maior índice de chuvas. Essa água se acumula no interior dos elementos construtivos e elimina o excesso de umidade por transmissão de vapor conforme as condições térmicas do edifício mudam. Além disso, a presença de sais marinhos em edifícios próximos e a alta capacidade de absorção dos materiais estudados, apresentam um comportamento propenso ao arraste de sais em solução durante o período chuvoso, o que favorece o aparecimento de eflorescências, o que aumenta o risco de condensação umidificações. Por outro lado, em relação ao uso de técnicas de análise termográfica, as imagens permitiram detalhar com maior precisão as patologias existentes, principalmente as decorrentes de vazamentos térmicos e áreas de acúmulo de umidade, imperceptíveis à exploração visual. Esse fato evidencia a viabilidade do uso da termografia para identificar patologias em edificações em alvenaria que possam estar ocultas por revestimentos ou condições geométricas que impeçam sua detecção a olho nu. Além disso, com o uso dessa técnica é possível delimitar com mais precisão as superfícies de reparo do ponto de vista de uma futura intervenção em comparação com uma análise visual direta sem termografia como comentado por Barbosa (Barbosa et al, 2021).

5. ACKNOWLEDGEMENTS AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Bispado de Orihuela-Alicante a disponibilidade para realizar este estudo num imóvel catalogado.

6. REFERÊNCIAS

- Barbosa, M.T.G., Rosse, V. J., Laurindo, N. G. (2021), “*Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades*”, Journal of Building Engineering, 43, art. no. 102555, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102555>
- Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Simões, M.L., Rebelo, D. (2020), “*Quantitative infrared thermography to evaluate the humidification of lightweight concrete*”, Sensors (Switzerland), 20 (6), art. no. 1664, DOI: <https://doi.org/10.3390/s20061664>
- Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Simões, M.L. (2021), “*Emissivity of building materials for infrared measurements*”, Sensors, 21 (6), art. no. 1961, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21061961>
- Bevià García, M., Azuar Ruiz, R. (2005), “*Santa María descubierta: Arqueología, arquitectura-cerámica: Excavaciones en la Iglesia de Santa María de Alicante (1997-1998)*”. Alicante. Fundación MARQ. ISBN: 84-609-7478-2
- Brotóns, V., Tomás, R., Ivorra, S., Alarcón, J.C. (2013), “*Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite*. Engineering Geology”, 167, pp. 117-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.012>

- Giovannacci, D., Brissaud, D., Mertz, J.-D., Mouhoubi, K., Bodnar, J.-L. (2017), “*Nonintrusive tools to detect salts contamination in masonry: Case study of Fontaine-Chaalis church*”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10331, art. no. 1033103. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2269727>
- Grossi, C. M. Esbert, R. M. (1994), “*Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica*”. Materiales de Construcción, Vol. 44, nº 235. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.1994.v44.i235.579>
- Louis, M., García del Cura, M. A., Spairani, Y., de Blas. D. (2001), “*The Civil Palaces in Gravina Street, Alicante: building stones and salt weathering*. Materiales de Construcción”, Vol. 51, nº262. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i262.369>
- Lucchi, E. (2018), “*Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, pp. 3077-3090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
- Paricio Ansuateguie, I. “*La construcción de la Arquitectura. Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya*”, 1985, T.2, p. 26. ISBN: 978-84-7853-375-6
- Norma Básica de la Edificación. Cubiertas con materiales bituminosos: “NBE QB-90”. Gobierno de España.
- Ruiz Valero, L., Flores Sasso, V., Prieto Vicioso, E. (2019), “*In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques*”, Case Studies in Construction Materials, 10, art. no. e00228, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00228>
- Silva, G. P., Batista, P. I. B., Povóas, Y. V. (2019), “*Uso de termografia infrarroja para estudar el desempeño térmico de paredes: una revisión bibliográfica*”, Revista ALCONPAT, 9(2), pp. 117 – 129, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.341>
- Takeda, T. Mazer, W. (2018), “*Potencial da análise termográfica para avaliar manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas*”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 38 – 50, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.181>
- Valluzzi, M.R., Lorenzoni, F., Deiana, R., Taffarel, S., Modena, C. (2019), “*Non-destructive investigations for structural qualification of the Sarno Baths, Pompeii*”, Journal of Cultural Heritage, 40, pp. 280-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.015>
- Vijay, P.V., Tulasi Gadde, K., Gangarao, H.V.S. (2019), “*Structural Evaluation and Rehabilitation of Century-Old Masonry and Timber Buildings*”, Journal of Architectural Engineering, 25 (2), art. no. 05019001, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000350)
- Garrido, I., Solla, M., Lagüela, S., Fernández, N. (2020), “*Irt and gpr techniques for moisture detection and characterisation in buildings*”, Sensors (Switzerland), 20 (22), art. no. 6421, pp. 1-38. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20226421>
- Martínez-Garrido, M.I., Fort, R., Gómez-Heras, M., Valles-Iriso, J., Varas-Muriel, M.J. (2018), “*A comprehensive study for moisture control in cultural heritage using non-destructive techniques*”, Journal of Applied Geophysics, 155, pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.008>
- Zhang, F., Zhang, X., Li, Y., Tao, Z., Liu, W., He, M. (2018), “*Quantitative description theory of water migration in rock sites based on infrared radiation temperature*”, Engineering Geology, 241, pp. 64-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.006>

Thomas, c., Lombillo, I., Setién, J., Polanco, J. A., Villegas, L. (2008), “*Absorción por capilaridad y consolidación de materiales pétreos del patrimonio histórico construido impermeabilizados y reforzados con productos hidrofugantes y consolidantes comerciales*”. Tecnología de la rehabilitación y la gestión del patrimonio construido (REHABEND). ISBN: 978-84-692-5650-3.

UNE EN 13187 (1998). “*Prestaciones térmicas de edificios. Detección cualitativa de irregularidades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos*”. Asociación Española de Normalización.

30 anos de investigações sobre concreto com adição de borracha (1990-2020). Uma análise bibliométrica

Z. Zarhri^{1*} , W. Rosado Martinez² , J. Dominguez Lepe² , R. E. Vega-Azamar² , M. Chan Juarez² , B. Pamplona Solis² 

* Autor de Contato: z.zarhri@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.554>

Recepção: 31/08/2021 | Aceitação: 09/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo bibliométrico da literatura sobre o uso de borracha reciclada de pneus na indústria da construção para promover seu uso como matéria-prima para reduzir a poluição em nível global. Artigos publicados entre 1990 e 2020 em ambas as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) foram levados em consideração usando o Methodi Ordinatio e o software VOSviewer. Nesse período, foram publicados 967 documentos sobre o uso de borracha reciclada em concreto estrutural e não estrutural e 1182 autores contribuíram com o assunto. Desde 2010, o interesse dos pesquisadores em introduzir borracha reciclada em aplicações de construção aumentou significativamente. China, Estados Unidos da América e Austrália são os países líderes na pesquisa de concreto com adição de borracha.

Palavras-chave: concreto com adição de borracha; construção; borracha fragmentada; análise bibliométrica; *Methodi Ordinatio*.

Citar como: Zarhri, Z., Rosado Martinez, W., Dominguez Lepe, J., Vega Azamar, R. E., Chan Juarez, M., Pamplona Solis, B. (2022), “30 anos de investigações sobre concreto com adição de borracha (1990-2020). Uma análise bibliométrica”, Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 127 – 142, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.554>

¹ CONACYT-Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal; Insurgentes 330, C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, Mexico

² Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal; Insurgentes 330, C.P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, Mexico.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, William Rosado Martinez fez os estudos bibliométricos e contribuiu para a discussão e redação do manuscrito (30%). Zakaryaa Zarhri supervisionou todo o trabalho e redigiu o documento em inglês (30%). Jose Antonio Dominguez Lepe (10%), Ricardo Enrique Vega Azamar (10%) e Maritza Chan Juarez (10%) contribuíram para a discussão dos resultados e a correção do manuscrito. Blandy Berenice Pamplona Solis contribuiu com a metodologia e resultados do documento (10%).

Licença Creative Commons

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

30 years of rubberized concrete investigations (1990-2020). A bibliometric analysis

ABSTRACT

This work presents a bibliometric study of the literature on the use of recycled rubber from tires in the construction industry to promote its use as a 'raw' material to reduce pollution at a global level. Published papers between 1990 and 2020 in both databases Scopus and Web of Science (WoS) were taken into account using the Methodi Ordinatio and the VOSviewer software. A total of 967 documents on the use of recycled rubber in structural and non-structural concrete have been published during this time frame and 1182 authors have contributed on the subject. Since 2010, the interest of researchers to introduce recycled rubber in construction applications has increased markedly. China, the United States of America and Australia are the leading countries in rubberized concrete research.

Keywords: rubberized concrete; construction; crumb rubber; bibliometric analysis; *Methodi Ordinatio*.

30 años de investigaciones sobre concreto con caucho (1990-2020). Un análisis bibliométrico

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio bibliométrico de la literatura sobre el uso del caucho reciclado de las llantas en la industria de la construcción para promover el interés de utilizarlo como materia prima para reducir la contaminación a nivel global. Se consideraron los trabajos publicados en el período 1990-2020, tanto en las bases de datos de Scopus como de Web of Science (WoS), y se utilizó el *Methodi Ordinatio* y el software VOSviewer para llevar a cabo el análisis. En este período de tiempo, se ha publicado un total de 967 documentos sobre el uso del caucho en concretos estructurales y no estructurales y han contribuido 1182 autores en el tema. Desde 2010, ha aumentado notablemente el interés de los investigadores por introducir el caucho reciclado en aplicaciones constructivas. China, Estados Unidos y Australia son los países líderes en la investigación del concreto con caucho reciclado proveniente de los neumáticos.

Palabras clave: concreto con caucho reciclado; construcción; polvo de neumático; análisis bibliométrico; *Methodi Ordinatio*.

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 gestão e destinação inadequada de resíduos sólidos é uma das atividades que mais afetam o meio ambiente. Um aumento na geração de resíduos de até 70% é esperado até 2050, de 2,01 bilhões de toneladas em 2016, um total de 3,4 bilhões de toneladas de resíduos anuais é projetado para o ano de 2050, de acordo com o Banco Mundial no relatório de 2018 “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050” (Banco Mundial, 2019).

Principalmente, quando se trata de borracha e resíduos de pneus, devido à sua natureza e potencial poluição, esse tipo de resíduo deve ser processado e enterrado em aterros sanitários como forma de disposição final, porém, isso pode levar à contaminação do solo e subsolo. Portanto, é importante encontrar uma forma de reaproveitar parcial ou totalmente esses resíduos para que, ao final de sua vida, possam ser transformados de material potencialmente poluente em matéria-prima para a indústria. Resíduos de pneus são um dos materiais mais poluentes porque a vulcanização é um processo irreversível, dificultando a elaboração de um plano de resíduos. Para o tratamento adequado desse tipo de resíduo, a indústria conta com instalações especiais de reciclagem, das quais podem ser obtidos subprodutos como fibras de reciclagem de pneus, borracha granulada, borracha em forma de cavacos, pó de borracha e também fibras de aço (Thomas et al., 2016).

Uma das soluções oferecidas é usá-lo como matéria-prima (Perez, 2015). Atualmente, a comunidade científica tem reconhecido o problema que isso representa, razão pela qual diferentes alternativas para o uso da borracha de resíduos e da indústria de reciclagem têm sido propostas e analisadas para sua aplicação em algumas áreas da engenharia. Isso envolve desenvolvimento econômico, criação de empregos, bem como o cumprimento de um objetivo principal: a redução de poluentes no meio ambiente (Al-Salem et al., 2009; Ghosh, 2019; Ruwona et al., 2019; Yang et al., 2018).

Esta revisão bibliográfica se baseia na busca dos artigos mais relevantes sobre o assunto, bem como em uma análise aprofundada da literatura selecionada, com o objetivo de levantar dados sobre a importância do estudo da borracha para a comunidade científica.

Este artigo tem como objetivo realizar uma análise quantitativa da evolução do estudo do concreto com adição de borracha entre 1990 e 2020, com o objetivo de compilar e analisar os mais importantes artigos de pesquisa utilizando o método bibliométrico *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015b) para obter os artigos mais relevantes com base no fator de impacto dos periódicos, no número de citações e no ano de publicação (De Campos et al., 2018). Este artigo é dirigido a pesquisadores e praticantes do assunto, exigindo uma extensa análise da literatura existente para trabalhos futuros.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do trabalho, as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) foram consideradas de maior importância (mas principalmente da Scopus) no desenvolvimento da análise bibliométrica para a pesquisa bibliográfica, contemplando um período de busca entre janeiro de 1990 e novembro de 2020.

Uma vez que essas variáveis foram selecionadas, os bancos de dados foram explorados usando a palavra-chave ‘concreto com adição de borracha’ como ponto de partida. Foram encontrados 610 artigos na base de dados Scopus e 357 artigos na WoS. Com base nesses resultados, foram selecionadas as principais palavras-chave.

Posteriormente, foi gerado um banco de dados nos formatos Comma Separated Values (CSV) e Text File (TXT) para posterior análise em uma ferramenta de software para construção e visualização de redes bibliométricas denominado VOSviewer. A Fig. 1 mostra o diagrama das palavras-chave dos bancos de dados Scopus e WoS com base na frequência de repetição das

palavras.

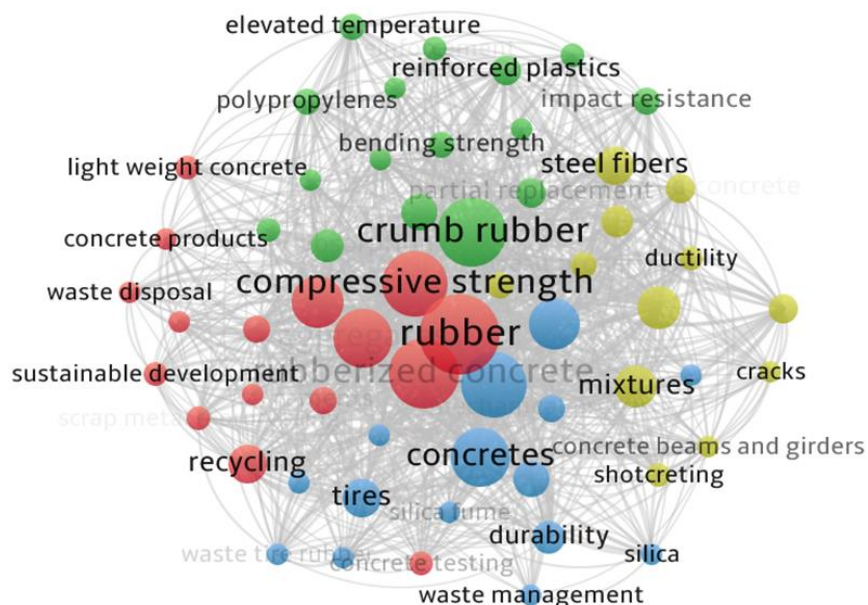


Figura 1. Mapa bibliométrico criado com VOSviewer mostrando a frequência (co-ocorrência de palavras-chave) de palavras-chave apresentadas em 'concreto com adição de borracha'

Para a revisão bibliográfica, foi utilizado o método *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015a), que consiste em 9 etapas:

- Fase 1: Estabelecimento da intenção de pesquisa: O objetivo da pesquisa foi analisar as informações nas bases de dados sobre o tema 'concreto com adição de borracha'
- Fase 2: Pesquisa preliminar no banco de dados com a palavra-chave 'concreto com adição de borracha'.
- Fase 3: Decisão final sobre a combinação de palavras-chave para a busca em bancos de dados: 'borracha em migalhas', 'comportamento', 'propriedades mecânicas', 'desempenho', 'resistência', 'concreto com adição de borracha', 'concreto', 'agregado', 'durabilidade' e 'borracha para pneus'.
- Fase 4: Pesquisa final nas bases de dados; os operadores Booleanos usados foram: 'borracha fragmentada' E 'comportamento' E 'propriedades mecânicas' E 'desempenho' E 'resistência' E 'concreto com adição de borracha' E 'concreto' E 'agregado' E 'durabilidade' E 'borracha de pneu'. Os resultados foram exportados em formato csv e txt para posterior análise no VOSviewer.
- Fase 5: Filtragem das informações: A partir da fase anterior, foram obtidos os artigos a serem filtrados, em seguida, procedeu-se à nova filtragem até a obtenção dos artigos mais relevantes para a aplicação da equação *InOrdinatio*.
- Fase 6: Identificação do fator de impacto, ano de publicação e número de citações: Com os resultados obtidos da busca nas duas bases de dados (Scopus e WoS), foi realizada a análise por número de citações e ano de publicação. O fator de impacto do jornal foi obtido por meio do banco de dados do Clarivate Analytics Incites Journal Citation Reports ou da Scopus Source List.
- Fase 7: Obtenção da classificação dos artigos: Concluída as fases 1 a 6, foi utilizada a equação do índice *InOrdinatio* para calcular a classificação dos artigos. Essa equação considera o total de citações, o fator de impacto e um fator de ponderação fornecido pelo pesquisador, que varia de 1 a 10.

$$InOrdinatio = \left(\frac{IF}{1000}\right) + \alpha (\text{ano de pesquisa} - \text{ano de publicação}) + \sum Ci$$

onde,

IF = fator de impacto (JCR, CiteScore, SJR ou SNIP)

α = coeficiente (1 a 10) que avalia a importância do ano em que o artigo foi publicado

Ano de pesquisa = ano em que a pesquisa foi realizada

$\sum Ci$ = número total de citações do artigo

Para considerar não apenas publicações de longa data, um valor alfa de sete foi escolhido (Pamplona Solis et al., 2019). Um valor alfa próximo a um ($\alpha = 1$) gera portfólios com artigos clássicos, mas se os artigos recentes são mais importantes para a pesquisa, então o valor alfa deve ser próximo a 10.

- Fase 8: Busca de artigos: Uma vez obtida a classificação dos artigos pelo método *InOrdinatio*, sua versão completa foi obtida por meio de um software de gerenciamento de referências como o Mendeley, Citavi ou Zotero.
- Fase 9. Leitura final e análise sistemática dos artigos: Uma revisão sistemática pode ser um trabalho extenso e trabalhoso; *Methodi Ordinatio* ajuda a criar uma lista ordenada de todos os artigos relevantes para facilitar a análise do pesquisador.

O VOSviewer é um software desenvolvido para complementar este tipo de metodologias. As informações que podem ser extraídas são a frequência da palavra-chave, que é exibida com base na área dos círculos. As menores representam palavras-chave que não são tão relevantes, enquanto as do meio (e maiores) representam palavras-chave relevantes nos diferentes artigos publicados. Por exemplo, a palavra 'borracha' é mais relevante por razões óbvias. Porém, em alguns artigos com a mesma palavra-chave, podem ser encontrados tópicos de interesse como o pré-tratamento do material ou a interface borracha-cimento. Em comparação com 'fibras de aço', que são as fibras de aço extraídas dos pneus usados, há pouco interesse dos pesquisadores, uma vez que há menos presença desta palavra-chave. Isso deixou claro que este diagrama fornece uma visão geral dos tópicos estudados e não reflete nenhum resultado final, é um procedimento prévio à filtragem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo da pesquisa foi encontrar artigos contendo a palavra 'concreto com adição de borracha' no título, resumo ou palavras-chave no período entre 1990 e 2020.

O uso de borracha no concreto foi escolhido como o tema principal para a análise, portanto a primeira busca de artigos foi realizada considerando a inclusão da palavra-chave inicial 'concreto com adição de borracha'. A prioridade foi dada aos artigos na língua inglesa, bem como aos da base de dados Scopus. Para o período de análise, 610 artigos foram registrados no Scopus e 357 no WoS. A primeira publicação registrada na base de dados Scopus foi da American Society for Testing and Materials (ASTM) em 1990. A maior produção científica ocorreu em 2020 com 125 artigos publicados na base de dados Scopus e um total de 97 artigos na WoS. Na Fig. 2, pode-se observar mais detalhadamente como o estudo desse material para aplicações na construção civil vem crescendo.

Os resultados obtidos mostram a tendência de aumento do estudo do uso da borracha em traços de concreto nos últimos dez anos e destacam os artigos mais relevantes utilizando o índice *InOrdinatio*.

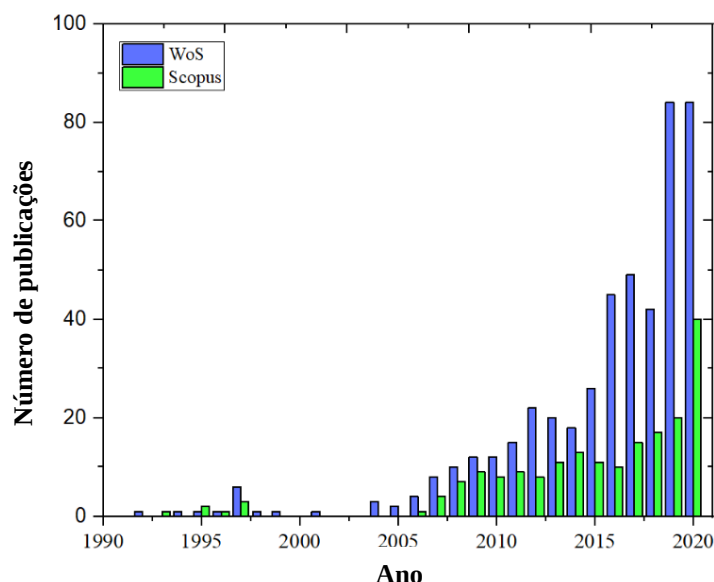


Figura 2. Número de artigos publicados por ano

A Fig. 2 mostra que, embora a frequência no estudo da borracha no concreto seja um tanto inconsistente em termos do número de artigos publicados por ano, nos últimos dez anos, os cientistas têm abordado esse tema em seus trabalhos de pesquisa com mais frequência. Isso resultou em uma maior produtividade dos artigos (aparentemente, a tendência continuará a aumentar nos próximos anos) e atualmente está sendo buscada como uma alternativa para mitigar a poluição global causada por resíduos de pneus.

De acordo com a base de dados Scopus, há um total de 610 artigos publicados sobre o tema ‘concreto com adição de borracha’ e um total de 1182 autores, entre janeiro de 1990 e novembro de 2020.

A Fig. 3 demonstra que o ano de maior atividade científica foi 2020 com um total de 409 autores. A tendência de pesquisas sobre o assunto tem aumentado substancialmente ao longo dos anos.

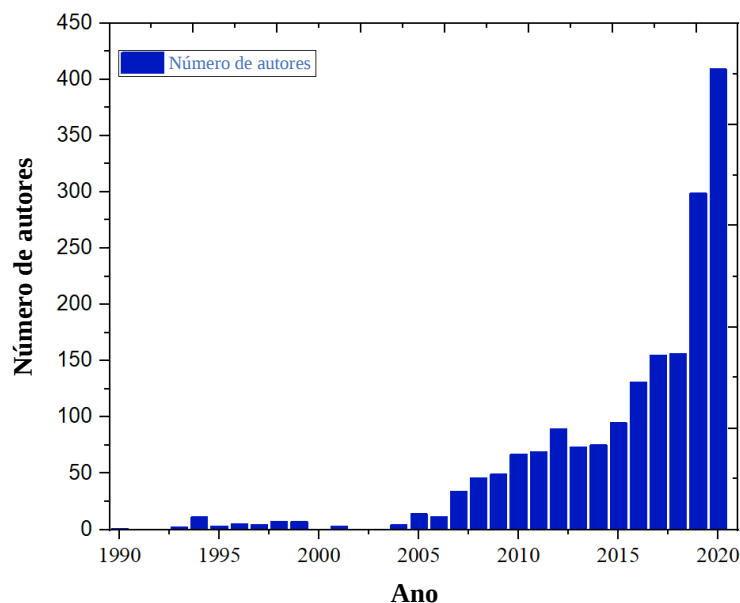


Figura 3. Número de autores por ano, 1990-2020.

A Fig. 4 mostra os dez principais países com maior número de contribuições no tema ‘concreto com adição de borracha’, os dez primeiros lugares foram considerados com base na quantidade de artigos publicados por ano.

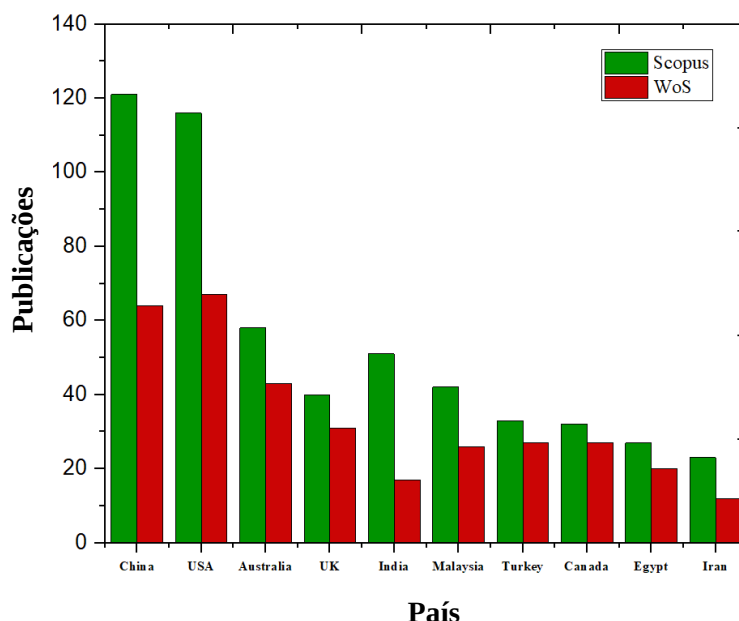


Figura 4. Os 10 principais países com o maior número de publicações (Scopus e WoS).

O país com maior produtividade científica é a China, com 121 artigos publicados pela Scopus, e 64 pela WoS, seguida dos Estados Unidos em segundo lugar e da Austrália em terceiro.

Definido o conjunto de artigos para análise da literatura, a busca foi realizada tanto no Scopus quanto no Web of Science. Para isso, foram utilizados os seguintes comandos Booleanos: 'TITLE-ABS-KEY (com adição de borracha E concreto) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2021' para Scopus, e 'TITLE-ABS-KEY (com adição de borracha E concreto) AND PUBYEAR > 1989 AND PUBYEAR < 2021' para WoS. Para o caso da WoS, foi considerada toda a coleção, enquanto para a Scopus foi considerada a totalidade da base de dados.

O portfólio total de artigos é composto por um total de 967. A Figura 4 ilustra como, durante a aplicação do método *InOrdinatio*, os artigos foram sendo descartados por questões de relevância ou porque o valor da *InOrdinatio* não era alto o suficiente para ser levado em consideração no portfólio final de documentos a serem analisados. A Tabela 1 mostra os artigos que atenderam aos critérios estabelecidos para um valor alfa de 7. A quantidade de artigos a serem analisados para o ranking *InOrdinatio* foi significativa, dado o recente aumento de produtividade sobre o assunto, em relação à década passada, porém, os artigos atendiam ao valor mínimo ou maior. Isso, devido a diversos fatores, como número insuficiente de citações ou baixo fator de impacto da revista para atingir o valor proposto.

Tabela 1. Número de artigos antes e depois dos filtros aplicados

Filtro	Artigos do portfólio	Artigos de cruzamento	Artigos restantes	%
WoS	610			
Scopus	357			
Portfólio bruto	967			100
Duplicado	140	140	827	85.52
Resenhas, capítulos de livros, artigos de conferências	98	98	729	75.38
Artigos publicados antes de 2010	105	105	624	64.52
<i>In Ordinatío</i> <75	617	617	7	0.72
Total de artigos descartados	911			
Total de artigos considerados	7			

Tabela 2. Lista dos artigos classificados por ordem de *InOrdinatío* no portfólio final.

Autor	Título	Ano	<i>InOrdinatío</i> Alfa= 7	<i>InOrdinatío</i>
Pelisser et al.	Concreto feito com borracha de pneu reciclada: efeito da ativação alcalina e adição de sílica ativa (Pelisser et al., 2011)	2011	1	280.007246
Najim et al.	Propriedades mecânicas e dinâmicas do concreto modificado autoadensável com borracha fragmentada (Najim & Hall, 2012)	2012	2	181.004419
Su et al.	Propriedades do concreto preparado com partículas de borracha de pneus de tamanhos uniformes e variados (Su et al., 2015a)	2014	3	135.007246
Thomas et al.	Reciclagem de resíduos de borracha de pneus como agregado no concreto: desempenho relacionado à durabilidade (Thomas et al., 2016)	2016	4	132.007246
Onuaguluchi et al.	Propriedades no estado endurecido de misturas de concreto contendo borracha fragmentada pré-revestida e sílica ativa (Onuaguluchi & Panesar, 2014)	2014	5	121.007246
Xue et al.	Concreto com adição de borracha: Um material estrutural verde com capacidade aprimorada de dissipação de energia (Xue & Shinozuka, 2013)	2013	6	104.004419
Youssef et al.	Uma investigação experimental do concreto com adição de borracha fragmentado confinado por tubos de polímero reforçados com fibra (Youssef et al., 2014)	2014	7	87.004419

Apesar de a maioria dos artigos analisados terem sido publicados recentemente, isso afeta o portfólio final de artigos, uma vez que muitos deles não tiveram citações suficientes para atender a um valor de *InOrdinatio* igual ou superior a 7 (Tabela 2). No entanto, isso não significa que não haverá artigos no futuro se tornando uma referência para o estudo da borracha em aplicações na construção civil, especificamente em concreto estrutural e não estrutural. Um exemplo é a interface borracha-cimento que, futuramente, será muito útil para o desenvolvimento de traços de concreto com adição de borracha a partir deste tema de pesquisa. Outros pesquisadores forneceram dados que serão úteis para investigações de longo prazo sobre o uso de borracha como uma mistura em materiais compostos e eficiência estrutural (Ataria & Wang, 2019). Os artigos mais importantes, de acordo com esta análise, estão listados na Tabela 2.

Outros autores também forneceram um resumo de 30 anos de pesquisa da borracha como material de construção, fornecendo uma análise extensa sobre pré-tratamento, propriedades mecânicas, propriedades físicas e outros dados úteis (Roychand et al., 2020).

Durante a análise da *InOrdinatio*, um total de 967 artigos foram inicialmente considerados na análise. Após a aplicação do filtro número dois, um total de 382 artigos foi considerado para a análise final. A Tabela 3 mostra as dez palavras-chave mais utilizadas nos estudos de borracha no concreto, bem como sua frequência. Estes artigos foram posteriormente analisados no software VOSviewer onde se pode verificar que a palavra-chave com maior presença na maioria dos artigos é 'borracha' com um total de 355 e a de menor frequência é “propriedades mecânicas” com um total de 82.

Tabela 3. As 10 principais coincidências de palavras-chave na revisão bibliográfica

Palavra-chave	Simultaneidade
rubber (borracha)	355
rubberized concrete (concreto com adição de borracha)	305
concretes (concretos)	234
compressive strength (resistência à compressão)	218
aggregates (agregados)	162
concrete aggregates (agregados de concreto)	127
crumb rubber (fragmentos de borracha)	128
tires (pneus)	95
tensile strength (resistência à tração)	94
mechanical properties (propriedades mecânicas)	82

A Fig. 5 mostra que a prioridade dos pesquisadores é a incorporação da borracha na construção civil, conforme a literatura. Por se tratar de uma preocupação global de poluição, esta tendência se reflete no uso das diferentes palavras-chave apresentadas na tabela acima mencionada. Além disso, no concreto com adição de borracha, um dos problemas que os pesquisadores têm tentado melhorar ao longo dos anos é a resistência à compressão, questão de extrema importância no desempenho do concreto por ser uma de suas funções principais, por isso o estudo desta propriedade específica é prioritário. Por isso, sua frequência é maior quando comparada a outras propriedades mecânicas. Observe que diferenças podem ser encontradas ao alterar os comandos Booleanos, portanto, os resultados podem ser diferentes e mais específicos.



Tabela 4. Os 10 principais autores com base em documentos publicados e citações

Autores	Documentos	Citações
Mills J. E.	20	414
Youssf O.	18	399
Hassanli R.	17	234
Silvestre N.	11	187
Guadagini M.	14	166
Pilakoutas K.	14	166
Ma X.	11	164
De Brito J	9	147
Duarte A. P. C.	8	141
Julio E.	8	141

No período compreendido entre os anos 1990-2020, considerado neste trabalho, desde a publicação do primeiro artigo na base de dados Scopus em 1990, o número de artigos publicados por ano era inferior a 10 até 2007.

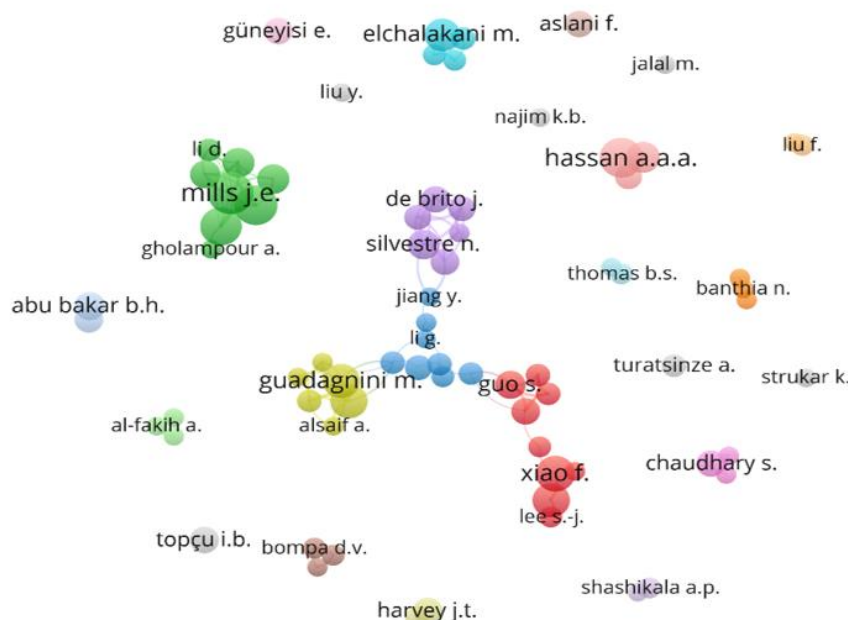


Figura 6. Diagrama de coautoria baseado em publicações de ‘concreto com adição de borracha’

Durante o período de 1990 a 2020, um total de 610 documentos foram publicados de acordo com a base de dados Scopus. Uma tendência inconsistente pode ser percebida nas publicações até 2007 e, a partir desse ano, a produtividade começou a aumentar significativamente até hoje. Para uma melhor análise, a Tabela 5 contém os dados dos artigos publicados por ano.

Tabela 5. Produtividade de artigos por ano do tema ‘concreto com adição de borracha’

Ano	Artigos	Ano	Artigos	Ano	Artigos
1990	1	2001	2	2012	38
1991	0	2002	0	2013	27
1992	0	2003	0	2014	26
1993	1	2004	6	2015	30
1994	5	2005	5	2016	51
1995	2	2006	6	2017	58
1996	3	2007	9	2018	53
1997	6	2008	16	2019	87
1998	4	2009	21	2020	111
1999	2	2010	17		
2000	0	2011	23		
Total	610				

A China, apesar de ser o primeiro país com maior produtividade em pesquisa, é o nono mais citado, sendo o Irã o que ocupa a primeira posição com 482 citações, portanto, apesar de sua baixa produtividade é colocado na primeira posição (Tabela 6). Essa tendência pode ser devida ao fato de os artigos publicados por pesquisadores iranianos apresentarem um fator de impacto de periódico superior quando comparados aos de pesquisadores chineses cujo fator de impacto não é tão alto. Um exemplo disso é Su et al. (2015b) e Chen et al. (2019) que, apesar de não serem artigos antigos, podem ser considerados clássicos sobre o assunto.

Tabela 6. Top 10 dos países mais citados.

País	Citações
Irã	482
Turquia	435
Canadá	362
Estados Unidos da América	282
Austrália	271
Índia	231
Iraque	148
Egito	113
China	84
Malásia	65

Austrália e Estados Unidos têm uma relação produtividade-citação semelhante. Sendo estes os países mais importantes quando ambas as variáveis são consideradas. Porém, o Irã apresenta o maior número de citações e o 10º lugar em produtividade documental. A Fig. 7 mostra uma representação gráfica da colaboração entre os países e como eles estão ligados entre si. É um complemento ao diagrama da Fig. 6, mas foca na colaboração entre países na tentativa de especificar quais lugares do mundo têm interesse no assunto em termos de produtividade científica.

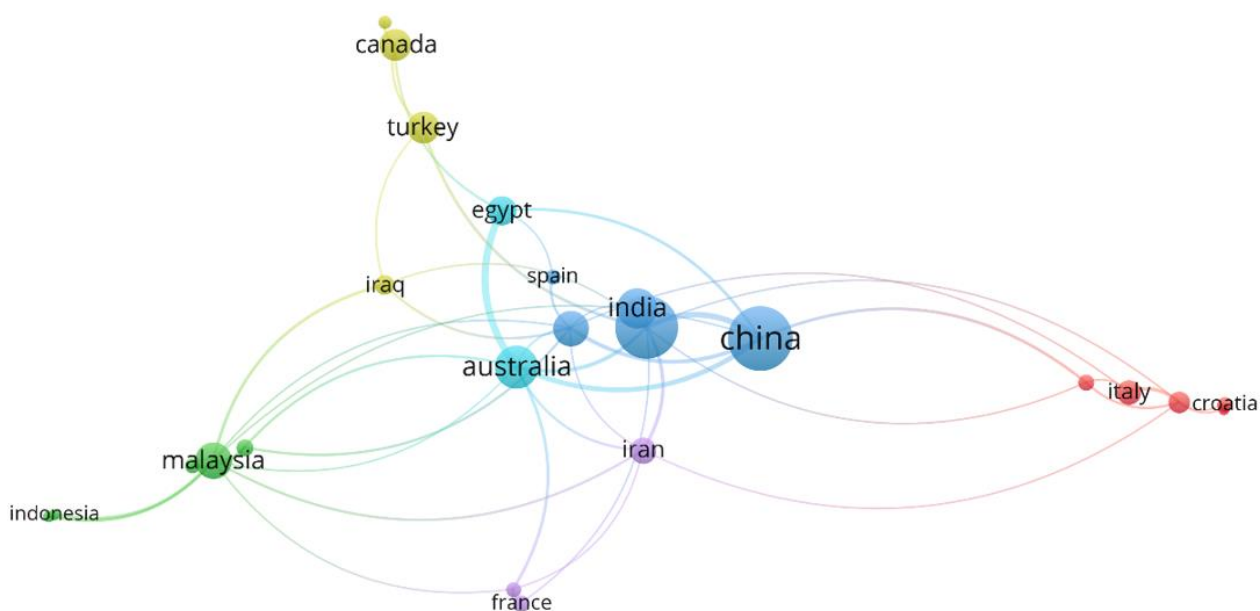


Figura 7. Diagrama de colaboração do país com base na coautoria de publicações sobre o tema ‘concreto com adição de borracha’

A revista com maior produtividade é *Construction and Building Materials*, com fator de impacto de 4,69. No entanto, o jornal com o fator de impacto mais alto é o *Journal of Cleaner Production* com um IF de 7,10, esses valores de impacto estão de acordo com o Clarivate Analytics.

Os objetivos e escopo dos periódicos são principalmente construção, ciência dos materiais e questões ambientais. Em geral, a maior parte da pesquisa se concentra na construção sustentável (Su et al., 2015b), materiais alternativos (Yang et al., 2018) e, em alguns casos, análise mecânica de estruturas (Ataria & Wang, 2019) (Tabela 7).

Tabela 7. Produtividade de publicações e citações por periódico

Fonte	Documentos	Citações
Construction and Building Materials	115	3739
Journal of Cleaner Production	32	1354
Journal of Materials in Civil Engineering	23	1291
Engineering Structures	8	153
ACI Materials Journal	13	187
Materials and Structures/Materiaux et Constructions	11	403
Materials	14	86
Composite Structures	8	82
Journal of Building Engineering	7	142
Structures	6	95

Os três periódicos com maior número de citações são *Construction and Building Materials* com 3.739 citações, *Journal of Cleaner Production* com 1354 e *Journal of Materials in Civil Engineering* com 1291. Esses três periódicos são os que apresentam maior produtividade e quantidade de citações no mundo (Tabela 7). A Fig. 8 mostra graficamente como os dados se comportam e dá uma ideia de quais são os periódicos mais importantes que os autores consideram para suas publicações. É um complemento à Tabela 7 e nos dá uma representação visual dos dados apresentados nesta tabela.

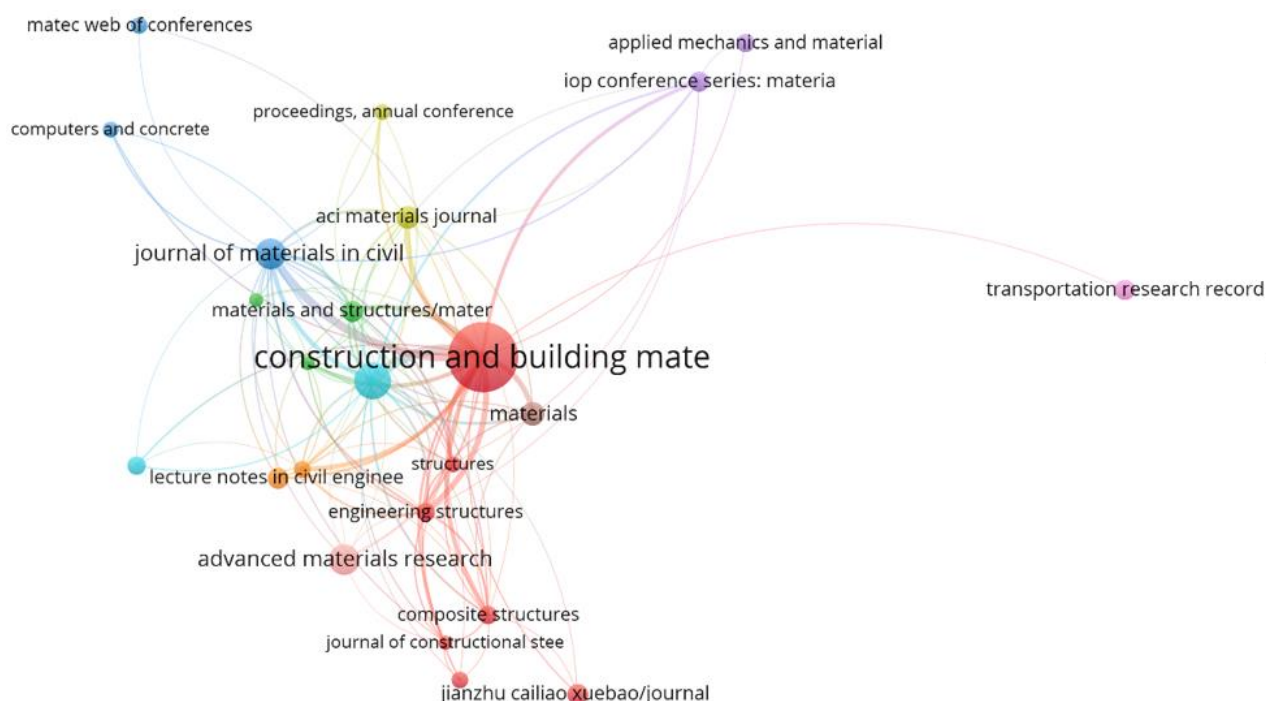


Figura 8. Mapa bibliométrico baseado nas citações dos periódicos mais relevantes sobre o tema ‘concreto com adição de borracha’

4. ANÁLISE CRÍTICA DAS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E NECESSIDADES ATUAIS DO CONCRETO COM RESÍDUOS DE PNEUS

Foi possível verificar que o uso de sílica ativa melhora a resistência mecânica do concreto com a adição de borracha. Apenas uma redução de 14% na resistência à compressão pode ser obtida. No entanto, seria interessante investigar como a resistência à compressão pode ser afetada ou melhorada com o complemento de sílica ativa. A sílica ativa também é considerada um melhorador da interface entre borracha e cimento, por isso pode ser proposta para o projeto de misturas de concreto com adição de borracha como material cimentício para melhorar a interface entre borracha e cimento (Pelisser et al., 2011).

As propriedades mecânicas e dinâmicas do concreto autoadensável foram investigadas, a borracha granulada foi utilizada como substituto do agregado fino, agregado graúdo e ambos (agregado fino e graúdo). As propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha, neste caso, são suficientes para serem utilizadas em um ambiente real. No entanto, os resultados dos ensaios de propriedades dinâmicas superaram os dados obtidos nos ensaios realizados em concreto convencional. A continuidade deste trabalho pode ser realizada através da realização de uma análise sísmica que pode lançar alguma luz sobre a aplicação deste material em elementos estruturais como fundações (Najim & Hall, 2012).

Pesquisas relacionadas a questões de durabilidade em concreto com adição de borracha concluíram que menor penetração de cloretos é obtida para 7,5% de adição. Em termos de ataque com ácido, foi observada uma diminuição no peso e na resistência à compressão. Por sua vez, a capacidade de dissipação de energia do concreto pode aumentar com a adição de borracha. Esta propriedade tem potencial aplicação em estruturas expostas a terremotos. Concluiu-se que a adição de borracha reduz a resposta às vibrações (Tomas et al., 2016).

A influência do tamanho das partículas na adição de borracha também foi investigada. Concluiu-se que a adição de borracha no concreto afeta a trabalhabilidade e a permeabilidade quando comparado a um concreto convencional. Especificamente, quanto maior o tamanho, melhoram as propriedades mencionadas acima. Uma investigação mais rigorosa pode ser feita para analisar a granulometria e determinar um tamanho de partícula ideal de borracha para melhores propriedades físicas em relação à norma ASTM C 33 que pode fornecer um parâmetro para uma aplicação de um ponto de vista mais técnico, bem como diretrizes para criar um sistema de projeto para misturas de concreto com adição de borracha (Youssif et al., 2014).

5. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo analisar os últimos 30 anos de pesquisa em borracha e sua aplicação em concretos estruturais e não estruturais por meio da análise *Methodi Ordinatio*. Uma revisão bibliográfica da literatura mostrou que, desde 2010, os cientistas consideram o impacto da poluição mundial causada por resíduos de pneus, o que leva a comunidade científica a encontrar uma forma de reduzi-la por meio do reaproveitamento.

Nesses 30 anos, foram publicados 967 documentos sobre o uso da borracha no concreto estrutural e não estrutural no período 1990-2020 e 1182 autores contribuíram sobre o assunto até o momento da redação de artigo com esse tema.

Diferentes propriedades têm sido estudadas, como resistência à compressão, volume de borracha nas misturas de concreto, bem como a granulometria das partículas de borracha e sua possível influência na resistência do concreto.

Atualmente, novos estudos revelam dados que vão servir em pesquisas futuras como o comportamento da interface borracha-cimento e o potencial que a borracha tem quando utilizada em materiais compósitos. Tudo isso abre uma nova etapa na pesquisa desse material para sua

aplicação direta em diferentes tipos de situações na indústria da construção.

De acordo com a análise da literatura, o concreto com adição de borracha apresenta menor resistência mecânica do que o concreto convencional e, também, a resistência mecânica diminui à medida que aumenta o volume de borracha na mistura do concreto, embora o potencial como adição em materiais compósitos mostre que a incorporação de borracha pode ser benéfico em aplicações estruturais. O uso de diferentes tamanhos de partículas na adição da borracha é um assunto que ainda requer um estudo mais aprofundado, uma vez que faltam dados conclusivos sobre a granulometria da adição e seu efeito no concreto. Atualmente, sabe-se teoricamente que o tamanho pode influenciar a resistência à compressão e a porosidade, porém, não existem tamanhos específicos que permitam um projeto padrão para misturas de concreto com adição de borracha.

Em um contexto global, pode-se observar que, de acordo com os dados analisados, desde 2010, o interesse dos pesquisadores em introduzir a borracha em aplicações na construção civil tem aumentado significativamente, a fim de reduzir a poluição em nível global. No entanto, ainda faltam regulamentações para seu uso em condições reais, como valores de granulometria e métodos de dosagem para esta adição específica, portanto, mais pesquisas devem ser realizadas sobre as características deste material para que possa ser regulamentado para seu uso apropriado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Cátedra CONACYT Project número 746, do LNS Project número 202101008N e do projeto CONACYT Fronteras (2096029).

7. REFERÊNCIAS

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009). *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. Waste Management, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Ataria, R. B., Wang, Y. C. (2019). *Bending and shear behaviour of two layer beams with one layer of rubber recycled aggregate concrete in tension*. Structures, 20, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.014>
- Chen, Z., Li, L., Xiong, Z. (2019). *Investigation on the interfacial behaviour between the rubber-cement matrix of the rubberized concrete*. Journal of Cleaner Production, 209, 1354–1364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.305>
- de Campos, E. A. R., Pagani, R. N., Resende, L. M., Pontes, J. (2018). *Construction and qualitative assessment of a bibliographic portfolio using the methodology*, Methodi Ordinatio. Scientometrics, 116(2), 815–842. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2798-3>
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2019). *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7290-1>
- Najim, K. B., Hall, M. R. (2012). *Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete*. Construction and Building Materials, 27(1), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>
- Onuaguluchi, O., Panesar, D. K. (2014). *Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume*. Journal of Cleaner Production, 82, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068>
- Pagani, R. N., Kovalski, J. L., Resende, L. M. (2015a). *Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication*. Scientometrics, 105(3), 2109–2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>

- Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., Resende, L. M. (2015b). *Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication*. *Scientometrics*, 105(3), 2109–2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>
- Pamplona Solis, B., Cruz Argüello, J. C., Gómez Barba, L., Gurrola, M. P., Zarhri, Z., Trejo Arroyo, D. L. (2019). *Bibliometric Analysis of the Mass Transport in a Gas Diffusion Layer in PEM Fuel Cells*. *Sustainability*, 11(23), 6682. <https://doi.org/10.3390/su11236682>
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., Bernardin, A. M. (2011). *Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition*. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>
- Perez, J. G. (2015). *Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho*. 79.
- Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., Mills, J. E. (2020). *A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete*. *Construction and Building Materials*, 237, 117651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651>
- Ruwona, W., Danha, G., Muzenda, E. (2019). *A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres*. *Procedia Manufacturing*, 35, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.029>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., Dirar, S. (2015a). *Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes*. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., Dirar, S. (2015b). *Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes*. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., Panicker, V. J. (2016). *Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance*. *Journal of Cleaner Production*, 112, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>
- What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. (2019, January 7). *Green Growth Knowledge Platform*. <https://www.greengrowthknowledge.org/research/what-waste-20-global-snapshot-solid-waste-management-2050>
- Xue, J., Shinozuka, M. (2013). *Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability*. *Construction and Building Materials*, 42, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005>
- Yang, Z., Ji, R., Liu, L., Wang, X., Zhang, Z. (2018). *Recycling of municipal solid waste incineration by-product for cement composites preparation*. *Construction and Building Materials*, 162, 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.081>
- Youssf, O., ElGawady, M. A., Mills, J. E., Ma, X. (2014). *An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes*. *Construction and Building Materials*, 53, 522–532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>