

ALCONPAT Internacional

Membros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Diretor General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vice-presidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vice-presidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesoureiro

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

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

Revista ALCONPAT

Editor em Chefe:

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

Co-Editor em Chefe (2022-2023):

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

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

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

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidad Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini

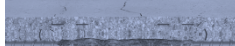
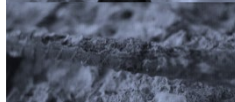
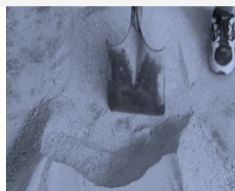
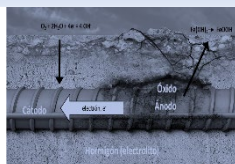
Universidad de Perugia,

Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,

Chennai, **India**



CONTENIDO

Página

REVISÃO

- Becerra, O., Meza, A., Salinas, R.:** Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística. 143 – 157

PESQUISA BÁSICA

- Navarrete-Seras, M., Martínez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Sanchez-Calvillo, A., Arreola-Sanchez, M., Borrego-Perez, J. A., Perez-Castellanos, N. A., Ruiz-Torres, R. P., Duran-Ramos, A. M., Alonso-Guzman, E. M.:** Influência da proporção de areia nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para construção. 158 – 174

- Alves, F. E. Z., Gurkewicz, R. P., Zancan, E. C., Nieves, L. J. J., Antunes, E. G. P.:** Estudo de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato. 175 – 191

- Luévanos Rojas, A.:** Um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares levando em consideração que a superfície de contato funciona parcialmente em compressão. 192 – 219

PESQUISA APLICADA

- Diniz, M., Melo, R.:** Análise da correlação entre a condição de pavimentos urbanos e elementos do sistema de drenagem. 220 – 234

PESQUISA DOCUMENTAL

- Donadio, M., Capacho, J., Santander, L.:** Gestão Total da Corrosão. Análise documental. 235 – 253

- Angulo, P., Ochoa, C.:** Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade da indústria cimenteira do México. 254 – 270

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistaalconpat.org>

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

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

Esta edição V13 N2 começa com um artigo do **México**, onde Alejandro Meza e colegas avaliam o efeito de variáveis experimentais no estudo da degradação de cloretos de concreto reforçado com fibra de aço (SFRCs). As informações foram coletadas de diferentes fontes literárias para, posteriormente, serem tratadas por meio do delineamento experimental e análise de regressão de Taguchi. Os resultados mostram que os fatores mais influentes na degradação dos SFRCs degradados por cloreto são a carga durante a degradação e a largura da fissura, fatores que impactam estatisticamente na resistência residual e na carga máxima de flexão. No entanto, outros como relação água/cimento, volume de fibras, concentração de cloretos e tempo de degradação mostraram pouca influência na resposta mecânica dos SFRCs.

Na segunda obra, do **México**, Marco Antonio Navarrete-Seras e colegas analisam a influência da proporção de areia em argamassas Tipo II de acordo com a norma N-CMT-2-01-004/02 usando três tipos de agregados da região de Morelia, Michoacán, determinando sua influência suas propriedades físico-mecânicas, contemplando a utilização de diferentes materiais cimentícios (MC): cimento Portland mais cal (B1) e cimento Portland mais cimento para alvenaria (B2). Misturas para B1 e B2 foram preparadas com relações areia/volume MC, de 2,25 a 4, determinando fluidez, resistência à compressão uniaxial (UCS) e resistividade elétrica úmida (WER). Foi estudada a relação entre a fluidez e a quantidade de água/MC, concluindo que o tipo de agregado e as proporções modificam a fluidez e a demanda de água no estado fresco, impactando na UCS e WER.

O terceiro artigo desta edição é do **Brasil**, onde Rafael P. Gurkewicz e seus colegas estão estudando a capacidade de absorção de água de painéis de concreto e seu processo de autocicatrização adicionando uma mistura ao concreto ou aplicando-a na superfície. Através dos testes de permeabilidade, absorção de água por imersão e capilaridade, após cura úmida, os painéis com aditivo cristalizante aplicado na superfície apresentaram menor capacidade de absorção, seguidos dos sem aditivo e dos com aditivo incorporado, que

apresentaram maior absorção. Através da microscopia, foi possível observar que a cristalização dos painéis com aditivo de superfície foi mais avançada em comparação com aqueles com aditivo incorporado. As fissuras induzidas não atingiram o preenchimento completo dos poros após a cura em ambos os tipos de aplicação.

No quarto artigo do **México**, Arnulfo Luévanos Rojas mostra um novo modelo para o dimensionamento completo de sapatas retangulares isoladas sob flexão uniaxial e biaxial, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo trabalha parcialmente em compressão. A metodologia é apresentada por integração para obtenção de momentos, flexão cortante e penetração. São apresentados exemplos numéricos para dimensionamento de sapatas retangulares isoladas sob flexão uniaxial e biaxial, e comparados com o modelo atual (área total trabalhada em compressão) em termos de volumes de concreto e aço. O modelo atual apresenta maiores volumes de concreto e aço. Portanto, o novo modelo é o mais adequado, pois apresenta melhor controle de qualidade nos recursos utilizados.

O quinto artigo, de Marian Diniz e R. Melo, vem do **Brasil** e analisa a correlação entre o índice de condição do pavimento e a condição de dois elementos de drenagem superficial: bueiros e sarjetas. O estudo foi realizado a partir da análise de 19 trechos, distribuídos pelo bairro de Tambaú, em João Pessoa-PB. O cálculo do estado dos pavimentos foi realizado pelo método PCI e o estado dos elementos de drenagem foi verificado por meio de análise subjetiva. Os resultados da investigação mostraram quando os elementos se enquadram ou não nas condições ideais, e embora os elementos de drenagem sejam considerados no desempenho do pavimento, a avaliação estatística mostrou uma fraca correlação entre o estado do pavimento e os elementos de drenagem avaliados.

O sexto artigo desta edição é escrito por Michel Donadio e colegas da **Suíça e do México**, no qual fazem uma análise documental das diferentes técnicas de mitigação de corrosão atualmente disponíveis, como argamassas de reparo, inibidores de corrosão ativos e passivos, corrosão, revestimentos protetores e corrente induzida ou proteção catódica galvânica. Estas estruturas, construídas para durar muito tempo, estão sujeitas ao envelhecimento devido às influências do seu ambiente, como a água, o dióxido de carbono atmosférico e outros elementos nocivos como os cloretos e a poluição. O processo de deterioração mais comum em estruturas de concreto armado é a corrosão e a consequente expansão da armadura de aço, que causa fissuração e lascamento do concreto.

O artigo que fecha a edição é de Patricia Angulo e Carlos Ochoa, do **México**, que identificam e discutem as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir as emissões de poeira de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, com o objetivo de melhorar competitividade da indústria cimenteira mexicana. O desenho da pesquisa foi qualitativo, observacional e dedutivo. Os resultados mostraram que os biorreatores de resíduos SO_x têm maior ecoeficiência; seguido dos domos para captação e aproveitamento do SiO₂ e dos filtros de mangas. Essas

estratégias são eficazes para poluentes específicos da produção de cimento. Este estudo investiga um tema pouco abordado no México, a sustentabilidade do cimento. Ao aplicar essas estratégias, o setor cimenteiro mexicano aumentaria sua competitividade empresarial.

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

Convidamos você a colaborar enviando artigos para nossa próxima edição especial (RA V13 N3): “Aglutinantes combinados para concreto sustentável e durável”, onde o Dr. Ravindra Gettu (Índia) e o Dr. Yuvaraj Dhandapani (Inglaterra) serão os Editores Convidados.

No fechamento da edição anterior, V13 N1 2023, 12 anos após o início das operações, nosso desempenho como ALCONPAT Journal foi finalmente recompensado com nossa inclusão em um dos dois melhores índices de periódicos como o Scopus da Elsevier. Nossa associação Scopus tem seu início histórico em 29 de dezembro de 2022, data em que recebemos a aprovação da Elsevier. Este é mais um motivo de comemoração para nossa comunidade que tem feito um investimento científico em nossa revista esperando por momentos como este. Parabéns a todos.

Pelo Conselho Editorial



Pedro Castro Borges
Editor chefe

Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística

O. Becerra¹ , A. Meza^{1*} , R. Salinas² 

* Autor de Contato: alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

Recebido: 04/10/2022 | Correções recebidas: 15/04/2023 | Aceito: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito de variáveis experimentais no estudo da degradação de cloretos de concretos reforçados com fibras de aço (SFRCs). As informações foram coletadas de diferentes fontes literárias e tratadas por meio do ábaco experimental de Taguchi e da análise de regressão. Os resultados mostram que os fatores mais influentes na degradação dos SFRCs degradados por cloreto são a carga durante a degradação e a abertura da fissura, fatores que impactam estatisticamente na resistência residual e na carga máxima de flexão. No entanto, outros como relação água/cimento, volume de fibras, concentração de cloretos e tempo de degradação mostraram pouca influência na resposta mecânica dos SFRCs.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras de aço; degradação; cloretos; variáveis experimentais; propriedades mecânicas.

Citar como: Becerra, O., Meza, A., Salinas, R. (2023), “Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 143 – 157, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

¹ Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica, Facultad de Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

² Departamento de Estadística, Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Oslery Becerra Pérez contribuiu com a busca e compilação da informação, com a análise estatística da referida informação em cerca de 50%, a discussão dos resultados em 40% e a elaboração do rascunho do artigo. O autor Alejandro Meza de Luna contribuiu com a direção e gestão da investigação, a discussão dos resultados em 40%, revisão e ajustes do artigo em 80%, e as funções de autor correspondente. O autor Rogelio Salinas contribuiu com a análise estatística de todas as informações encontradas em 50%, a discussão dos resultados em 20% e a revisão e ajustes do artigo em 20%.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effect of experimental variables in the study of chloride degradation of steel fiber reinforced concrete (SFRCs). The information was collected from different literary sources to later be treated through Taguchi's experimental design and regression analysis. The results show that the most influential factors in the degradation of SFRCs degraded by chloride are the load during degradation and the crack width, factors that statistically impact on residual resistance and maximum flexural load. However, others such as the water/cement ratio, fiber volume, chloride concentration and degradation time showed little influence on the mechanical response of the SFRCs.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; degradation; chlorides; experimental variables; mechanical properties.

Influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de acero (SFRC) en experimentos de degradación por cloruros: revisión bibliográfica y análisis estadístico

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de variables experimentales en el estudio de la degradación por cloruros de concretos reforzados con fibras de acero (SFRCs). La información fue recopilada de diferentes fuentes literarias para después ser tratada mediante el diseño experimental de Taguchi y análisis de regresión. Los resultados muestran que los factores más influyentes en la degradación de SFRCs degradados por cloruro son la carga durante la degradación y el ancho de fisura, factores que impactan estadísticamente sobre resistencia residual y la carga máxima a flexión. Sin embargo, otros como la relación agua/cemento, el volumen de fibras, la concentración de cloruros y el tiempo de degradación demostraron poca influencia sobre la respuesta mecánica de los SFRCs.

Palabras clave: concretos reforzados con fibra de acero; degradación; cloruros; variables experimentales; propiedades mecánicas.

Nomenclatura:

Vrr: Variação da resistência residual (%)

Vcm: Variação máxima de carga (%)

Rac: Relação água/cimento

Vf: Volume de fibra (%)

Td: Tempo de degradação (dias)

C: Concentração de cloreto (% w/w)

Cd: Carga exercida durante a degradação (kN)

Ca: Corrosão acelerada ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Ag: Abertura das fissuras controladas (mm)

Te: Tipo de experimento

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 é o material de construção mais utilizado a nível mundial, isto se deve principalmente à disponibilidade dos materiais que o constituem (Chen et al., 2021). O concreto possui propriedades que o tornaram o material de construção por excelência, uma vez que apresenta uma elevada resistência à compressão, podendo passar décadas sem exigir praticamente qualquer manutenção ou substituição (Paul et al., 2020). Apesar destas qualidades, o concreto apresenta uma resistência à flexão relativamente baixa devido aos esforços de tração que ocorrem, razão pela qual se tornou necessário o uso de materiais de reforço na preparação do concreto, que permitem melhorar as suas características (Chen et al., 2021). Desde o século XIX até o presente, o aço na forma de barras foi usado para reforçar estruturas de concreto. Embora as armaduras ainda sejam as mais utilizadas para esse fim, o uso de fibras teve um aumento significativo nas últimas décadas, gerando o que é conhecido como concreto reforçado com fibra de aço (CFRA), as fibras melhoram as propriedades de tração do concreto, resistência à fadiga, resistência ao impacto, tenacidade e ajudam a controlar fissuras. (Behbahani e Nematollahi, 2011; Kaur et al., (2012), Ferreira et al., 2018; Zhang et al., 2020). O CFRA é usado, por exemplo, no revestimento de túneis, construção de estradas e edifícios sujeitos a danos causados por terremotos (Berrocal, 2015; Marcos - Meson et al., 2019; Zhang et al., 2020). Além disso, o CFRA é aplicado em infraestruturas onde existam ambientes agressivos como pisos industriais, edifícios para armazenamento de resíduos nucleares, estruturas hidráulicas e marítimas, como docas, plataformas petrolíferas e gasodutos (Doo-Yeol et al., 2021, Hou e outros, 2021). Entre os materiais mais utilizados para esse fim estão o aço, materiais poliméricos e fibras de carbono, embora também tenha sido relatado o uso de vidro, coco, juta e amianto (Meza e Siddique, 2019; Paul et al., 2020; Meza e Shaikh, 2020; Meza et al., 2021), bem como fibra vegetal de agave (Juárez-Alvarado et al., 2017). As fibras de aço são o material mais utilizado e estudado como reforço de concreto (Horszczaruk, 2009; Hou et al., 2021).

Como visto anteriormente, os SFRCs são utilizados em infraestruturas submetidas a ambientes agressivos, por isso, a comunidade científica tem se encarregado de investigar os diferentes processos de degradação a que as estruturas feitas com SFRC podem ser submetidas. Várias investigações indicam que a corrosão é o principal mecanismo de degradação de estruturas de concreto armado (Paul et al., 2020; Berrocal et al., 2015; Berrocal et al., 2017). A corrosão causa a diminuição da seção transversal da armadura de aço (Berrocal, 2015), o que influencia negativamente nas características mecânicas do concreto armado com barras de aço e o SFRC. Somado a isso, é importante dizer que o processo de corrosão afeta não só as armaduras, mas também o concreto que as envolve. Isso se deve à formação de produtos de corrosão que se acumulam na interface aço-concreto e à medida que o volume aumenta, surgem pressões internas que provocam a fissuração e desprendimento do concreto, processo conhecido como deslocamento (Simões e Santo, 2019), que por sua vez aumenta a taxa de corrosão e, com isso, causa alterações em suas propriedades mecânicas, incluindo carga máxima e resistência residual (Berrocal et al., 2017; Paul et al., 2020). Segundo Abbas et al., (2014), a penetração de cloretos nas paredes dos túneis causa a corrosão das armaduras, reduzindo assim sua capacidade de carga. Além disso, outros pesquisadores, como Granju e Balouch, (2005) e Carrillo et al., (2017), afirmam que ambientes corrosivos podem afetar o desempenho à flexão do SFRC se as fibras de aço forem corroídas, já que essas causam reduções na carga de pico máxima, acompanhada por comportamento frágil pós -pico. Além disso, estudos como o de Hou et al., (2021) indicam que a diminuição da resistência residual em SFRCs tem estreita ligação com a perda de massa da armadura, corrosão por pite, deterioração da aderência entre armadura-concreto-taxa de corrosão. Por outro lado, são vários os fatores que influenciam o processo de corrosão, pois este depende tanto das características do metal corroído quanto do meio ambiente em que se encontra. Um desses fatores é a presença de agentes externos, tais como sais que contêm o íon cloreto, por exemplo,

cloreto de alumínio, cloreto de ferro, cloreto de amônio e cloreto de sódio. Esses sais, ao entrar no concreto, diminuem seu pH e aceleram o processo de corrosão da armadura de aço (Salazar-Jiménez, 2015). Especificamente, a degradação por cloretos causa o chamado efeito de corrosão por pites, isso ocorre quando cloretos suficientes se acumulam na superfície da armadura, favorecendo assim o processo corrosivo em uma área específica do material (Berrocal et al., 2015). A degradação do concreto reforçado com fibras pela ação dos cloretos tem sido amplamente estudada, devido à exposição das infraestruturas a ambientes agressivos com elevadas concentrações deste ânion (Berrocal et al., 2015). É por isso que pesquisas têm sido feitas tanto no efeito da degradação nas fibras, no concreto, quanto no conjunto fibra-concreto, conseguindo que suas propriedades mecânicas variem tanto, depois de serem submetidas a processos degradáveis por cloretos. Diferentes tipos de fibras e concretos foram testados em diferentes condições experimentais, o que fez com que os resultados obtidos nas referidas investigações fossem muito variados e nem sempre correlacionados entre si, por isso ainda não está completamente claro o que são as variáveis experimentais que mais afetam as características mecânicas do concreto e em que medida o fazem, o que poderia ser resolvido por meio de análises e pesquisas comparativas. Pelas razões acima mencionadas, este estudo compila dados experimentais obtidos em condições de laboratório, relacionados com a degradação de SFRC sob a ação de cloretos. Os dados das diferentes investigações foram submetidos a uma análise estatística onde se identificam as variáveis experimentais que mais influenciam a corrosão das fibras, a deterioração geral do concreto e até que ponto afetam as suas propriedades quando submetidas a esforços de flexão. Para isso, a análise dos dados experimentais obtidos da bibliografia foi realizada por meio do delineamento experimental robusto de Taguchi, que é um método de análise focado em maximizar uma relação sinal-ruído (S/R) específica para cada uma das variáveis estudadas, (Kuehl, 2000). O objetivo desta pesquisa é conhecer as variáveis experimentais que afetam as respostas, que são a diminuição da carga máxima e a diminuição da resistência residual após o processo de degradação. Uma análise de regressão também foi utilizada para representar os resultados obtidos através da análise experimental. Deseja-se que os resultados alcançados sirvam de base para os pesquisadores que iniciam o estudo do concreto armado com fibras de aço e sua degradação pela ação dos cloretos, desde uma revisão e análise bibliográfica do que de mais relevante foi publicado a respeito deste tema nos últimos anos.

2. PROCEDIMENTO

Como parte do procedimento seguido nesta pesquisa, em primeiro lugar, foram identificadas as variáveis experimentais que foram estudadas ao longo do tempo por meio da realização de ensaios de flexão de SFRCs que foram previamente expostos à degradação por cloretos e cuja variação influencia diretamente nas propriedades mecânicas de carga máxima e resistência residual. Para a análise dos dados obtidos, foi utilizado o projeto experimental Taguchi com a ajuda do Software Minitab (Minitab 17.0), além disso, foi realizada uma análise de regressão onde foi corroborada a influência das variáveis experimentais na variável resposta (ver Figura 1).

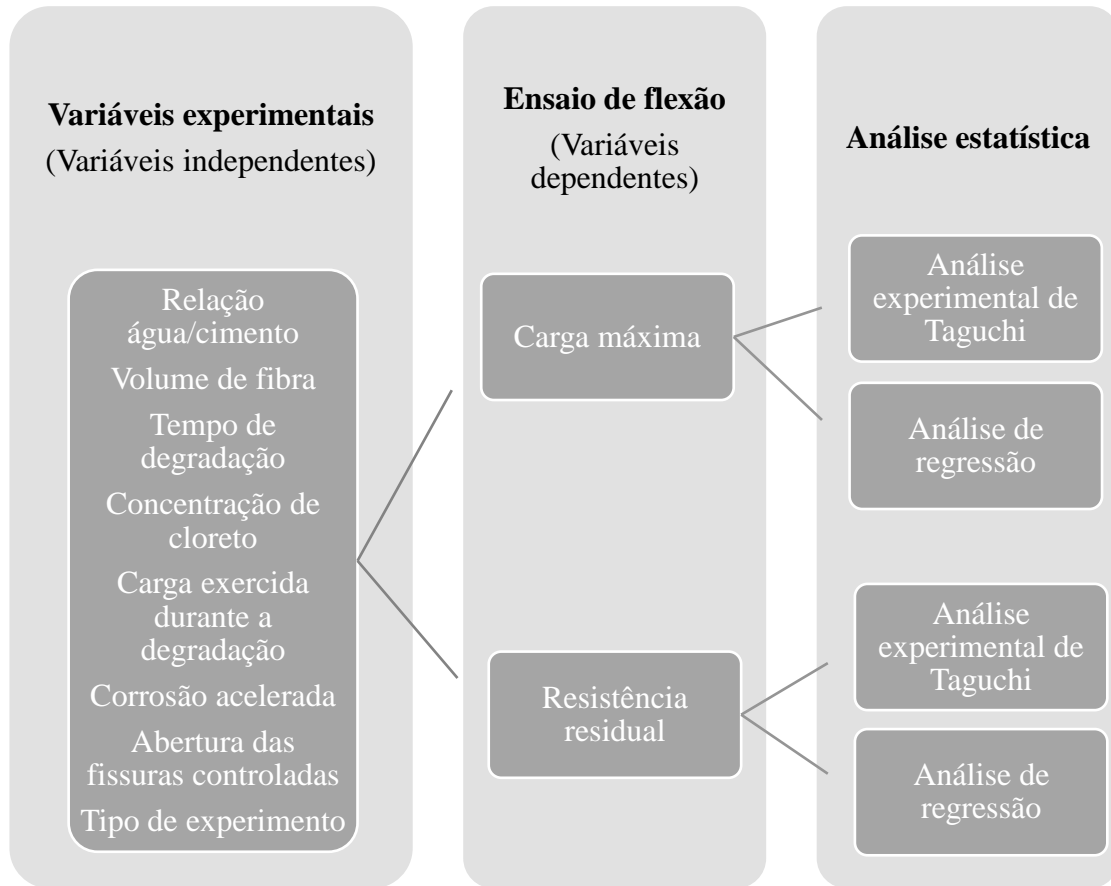


Figura 1. Esquema representativo do procedimento seguido da análise.

Uma das variáveis mais estudadas é a relação água/cimento (a/c). As proporções de água e cimento que são utilizadas na preparação do concreto influenciam significativamente nos processos corrosivos que a estrutura pode sofrer, isso porque quanto maior a quantidade de água, maior será a densidade de microporos que haverá na matriz do concreto, os quais facilitam a entrada de agentes corrosivos como cloretos. Além disso, quanto maior a quantidade de água, maior a umidade na estrutura, que é o eletrólito que facilita a reação de oxidação das fibras de aço. Segundo Balouch et al., (2010), quando há altas relações água/cimento ($a/c = 0,78$), as fibras que estão próximas à superfície do concreto (< 1 mm), apresentam sinais de corrosão e quanto mais essa proporção for reduzida, menor será a espessura necessária para que não haja corrosão nas fibras.

Outra variável determinante na degradação do SFRC é o volume de fibras (Vf) a ser utilizado no preparo das amostras, diversos autores têm direcionado seus estudos para determinar sua influência nas propriedades mecânicas desses concretos. Por exemplo, em seu estudo, Chen et al., (2021), chegaram à conclusão de que após o processo de degradação com cloreto de sódio, usando um maior teor de fibras, obtém-se como resultado um aumento da resistência dinâmica e, portanto, um aumento da tensão. Além disso, a concentração de cloretos (C) da solução aquosa com a qual o elemento de concreto em estudo se degrada tem influência significativa na corrosão das fibras e, portanto, nas propriedades do concreto estudado. Foi demonstrado que o teor máximo de cloretos em estruturas de concreto convencionais não deve ultrapassar 0,4% a 1,0% em peso de cimento, sendo este valor maior para os SFRCs, chegando a valores admissíveis de até 1,7% (Berrocal et al., 2013).

Por outro lado, em vários estudos de degradação de SFRCs, tem-se optado por fissurar o concreto de forma a obter maiores taxas de corrosão em períodos mais curtos, por isso a abertura das fissuras controladas (Ag) é uma variável considerada nesta pesquisa. Os resultados mostram que as fissuras

permitem o transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas (Berrocal et al., 2015; Blagojevic, 2016), demonstrando que se este exceder um determinado limite de abertura de fissura, eles poderão ser vistos afetam as propriedades do concreto. Pesquisas revelaram que o coeficiente de difusão de cloreto é semelhante em SFRC não fissurado e fissurado com aberturas de fissuras inferiores a 0,2 mm (Hou et al., 2021), o que dá uma certa medida de abertura de fissura para uso em experimentos deste tipo.

Outra variável a ter em conta é o tempo de degradação (Td) a que é submetida a amostra em estudo. O processo de degradação do concreto armado pode ser dividido em duas etapas fundamentais: iniciação e propagação. A primeira etapa é considerada como o tempo necessário para que os agentes externos entrem nas estruturas de concreto e causem a despassivação do aço. Na segunda etapa, ocorre a propagação da corrosão do aço e começam a ocorrer alterações na estrutura que reduzem sua segurança, o que indica que quanto maior o tempo gasto em condições degradadas, é de se esperar que o dano à estrutura seja maior (Berrocal e outros, 2015). Por outro lado, é importante mencionar que as estruturas de CRFA submetidas a ambientes degradativos e sob cargas de flexão, podem sofrer efeitos em suas propriedades mecânicas, devido à dupla influência da corrosão e da aplicação de uma força externa. Por esta razão, a carga durante a degradação (Cd) é uma variável que tem sido investigada em diversos estudos dedicados a este tema.

Embora a influência das cargas durante o processo de corrosão do concreto reforçado com fibras ainda não esteja totalmente esclarecida, foi demonstrado que a ação de forças em vigas experimentais de CRFAs aumentou a abertura das fissuras controladas formadas, o que pode ocasionar um aumento na taxa de corrosão das fibras (Li et al., 2018). É importante ressaltar que muitos pesquisadores utilizam métodos alternativos para realizar experimentos de degradação em concreto armado com fibras de aço, isso se deve ao fato de que o processo de corrosão das fibras é lento e em alguns casos pode levar anos para que haja efeitos apreciáveis de danos ao concreto de forma natural (Taqi et al. 2021). Portanto, a corrosão acelerada (Ca) surge como uma alternativa experimental apropriada nestes casos, que consiste em fazer uma corrente elétrica fluir nos corpos de prova de SFRC enquanto eles estão sob a ação de cloretos. Esse efeito combinado faz com que o limite de cloretos que deve ser ultrapassado para que ocorra a despassivação do aço diminua e, portanto, a corrosão das fibras ocorra mais rapidamente (Tang e Wilkinson, 2020).

Por último, outra das variáveis experimentais a ter em conta nos estudos de degradação é o tipo de experiência (Te), uma vez que existem duas formas de realizar estes ensaios. Um consiste na molhagem contínua da peça de concreto com uma solução de cloreto de sódio (NaCl) por um tempo determinado e o outro é baseado em ciclos de umedecimento e secagem, nos quais os corpos de prova de concreto são submersos em soluções de cloreto de sódio depois deixa-se secar por outro período definido, e assim o ciclo é repetido um certo número de vezes. Tem sido demonstrado que este tipo de experimento é a condição ambiental mais desfavorável para estruturas de SFRC submetidas a condições de degradação causadas pela ação de cloretos (Balouch et al., 2010).

Através da revisão bibliográfica realizada, foram obtidos dados experimentais de diferentes trabalhos relacionados com a degradação do concreto armado com fibras de aço (ver Tabela 1). Conforme mencionado, este trabalho enfocou a influência das variáveis experimentais mencionadas na redução da carga máxima e da resistência residual após o processo de degradação em ensaios de flexão. Em geral, os autores se basearam na norma EN 14651:2007 para ensaios de flexão em três pontos (Marcos- Meson et al., 2021), bem como nas normas EN 1015-3:1999, EN 413-2: 2016 e EN 14889-1:2006 para a utilização de superplastificante, o teor de ar e o tipo de fibra a utilizar respetivamente na preparação de corpos de prova de concreto (Marcos-Meson et al., 2020).

Tabela 1. Lista de trabalhos consultados para obtenção dos dados estudados.

Autor	a/c	Vf (%)	Td (dias)	C (%w/w)	Cd (kN)	Ca (uA/cm²)	Ag (mm)	Vcm (%)	Vrr (%)
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	0	0	0	-	28,79
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	54	0	0	-	42,28
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	89	0	0,14	-	66,62
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,15	5.45	9,41
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,3	-22.14	-18,87
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,15	-1.92	2,35
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,3	-32.82	-33,96
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,15	3.25	-11,30
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,3	16.01	1,64
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,15	-21.75	-7,83
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,3	17.20	12,30
Michel, 2013	0,43	0,5	24	3	0	150	0,07	-	26,44
Michel, 2013	0,43	1	24	3	0	150	0,07	-	20,39
Berrocal, 2017	0,47	0,5	27	3,5	0	100	0	1.29	17,98
Berrocal, 2017	0,47	0,5	97	3,5	0	100	0	-23.56	19,10
Bui, 2021	0,5	1	28	3	0	150	0	2.66	29,59
Bui, 2021	0,5	1,5	28	3	0	150	0	1.30	19,39
Bui, 2021	0,5	2	28	3	0	150	0	0.86	16,33
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	28	3,5	0	0	0	-1.90	1,43
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	70	3,5	0	0	0	1.24	-10,00
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	140	3,5	0	0	0	3.86	22,86
Bernard, 2019	0,5	1,5	176	3,5	0	0	0,15	15.31	37,50
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	13,6	200	0,06	23.35	1,98
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	20,4	200	0,09	13.55	2,97
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	27,2	200	0,12	30.51	4,95
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	34	200	0,14	14.23	5,94

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito de variáveis experimentais na variação da carga máxima

Para determinar o efeito das variáveis experimentais na variação da carga máxima (V_{cm}), foram selecionados os valores de diminuição da carga máxima que mais se repetiram em ensaios de flexão de SFRCs após serem submetidos a processos de degradação por cloretos. Para isso, foi feito um histograma com esses valores, obtendo que o maior número de variações são de -6 a 5% (ver Figura 2), porém, neste trabalho optou-se por não trabalhar com valores negativos, pois isso significa que há um aumento da carga máxima nos concretos estudados após serem expostos a cloretos e o estudo desse comportamento não é objetivo deste artigo. Portanto, foram tomados valores positivos de 0 a 31% e esses dados foram usados.

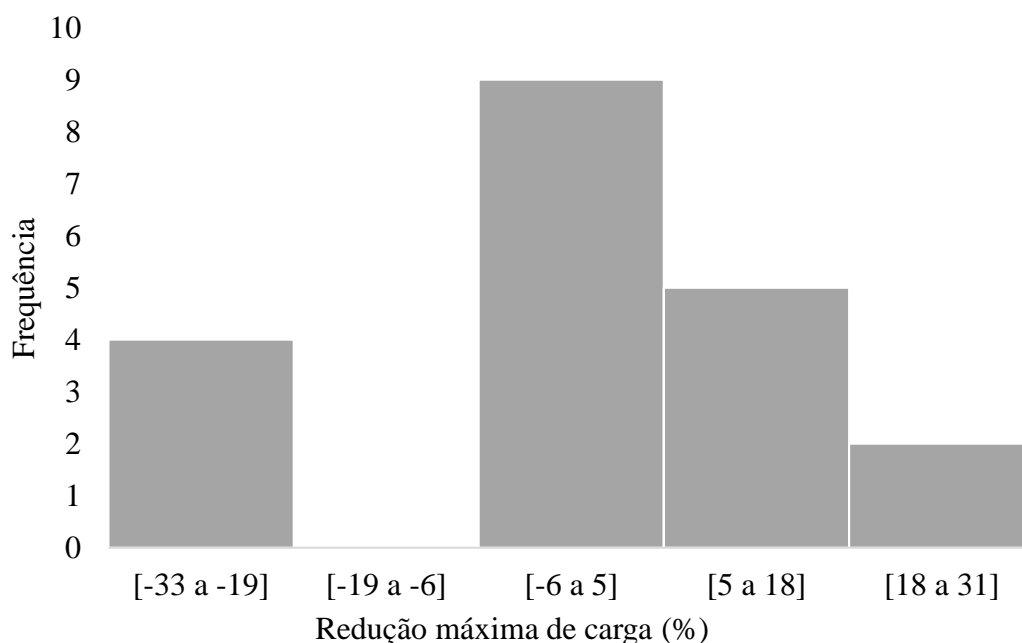


Figura 2. Histograma de variação de carga máxima.

3.1.1. Análise de plotagem de sinal-ruído

Analisando a Figura 3, é possível determinar quais fatores de controle têm maior incidência na variável resposta (a variação da carga máxima), isso é feito observando as linhas em cada variável, quando as linhas são horizontais não há efeito presente e cada nível afeta a resposta da mesma forma, enquanto quando as linhas não são horizontais, se houver um efeito principal e cada nível influencia a resposta de forma diferente, ou seja, quanto maior a distância na posição vertical entre os pontos plotados, maior a magnitude do efeito (Antony et al., 2006). Portanto, é possível afirmar que a abertura das fissuras controladas (A_g) é a variável com maior efeito sobre a capacidade máxima de carga à flexão de corpos de prova de SFRCs degradados por cloretos. Essa variável é seguida pelo volume da fibra (V_f), tempo de degradação (T_d), concentração de cloreto (C) e corrosão acelerada (Ca), em ordem de incidência na variável resposta, que são aquelas com maior separação entre seus níveis. Finalmente, a relação água/cimento (a/c), a carga durante a degradação (C_d) e o tipo de experimento (T_e), são os fatores com menor efeito na variação da carga máxima. Porém, como o objetivo deste trabalho é encontrar os valores das variáveis experimentais que provocam uma maior queda na carga máxima, estas podem ser determinadas pelo maior valor de cada fator no gráfico sinal-ruído da Figura 3 (marcada por um círculo vermelho). Portanto, um

projeto experimental recomendado para obter os maiores efeitos experimentais da variação máxima da carga de flexão em corpos de prova de SFRCs é o seguinte: a/c (0,47), Vf (0,75%), Td (72 dias), C (7%), Cd (27,2 kN), Ca (200 uA /cm²), Ag (0,12) e Te (úmido-seco).

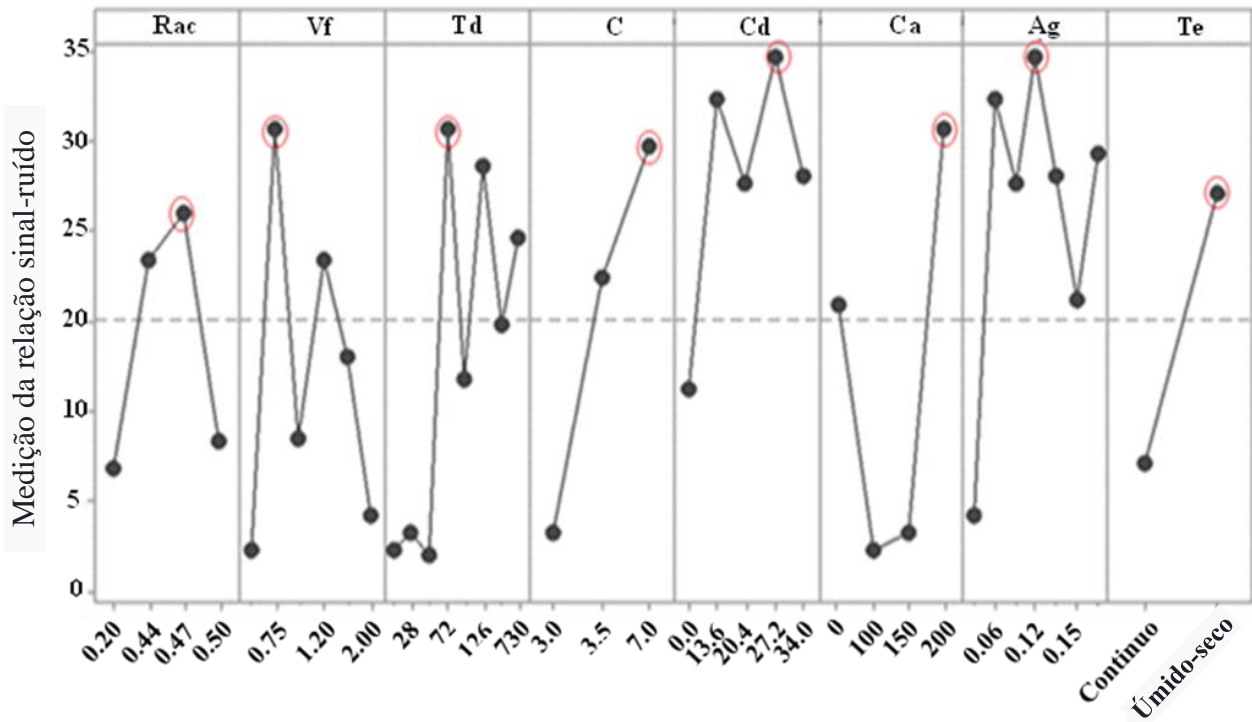


Figura 3. Gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído para experimentos de carga máxima.

3.1.2. Análise de regressão

Analisando a Tabela 2, que é o resultado da análise de variância para as variáveis estudadas, pode-se constatar que, para nenhuma das variáveis estudadas, o valor de p é inferior a 0,05, o que significa que estas não têm impacto estatístico sobre os resultados da variação da carga máxima em flexão. Na verdade, a variável com maior impacto estatístico na figura anterior, que foi a abertura das fissuras controladas, teve um Valor p de 0,081 nesta análise. Isso mostra que a análise de variância não é uma ferramenta útil neste caso para determinar a influência das variáveis explicativas sobre a variável resposta.

Tabela 2. Análise de variância das variáveis estudadas para variação da carga máxima.

Variáveis	Valor-p
Relação água/cimento	0,544
Porcentagem de fibra	0,841
Tempo de degradação	0,305
Concentração de NaCl	0,963
Carga durante a degradação	0,812
Corrosão acelerada	0,557
Abertura da fissura	0,081
Tipo do experimento	0,677

Analisando as equações de regressão para a variável qualitativa, que neste estudo é do tipo experimento, é possível determinar quais são as variáveis experimentais que possuem poder explicativo sobre a variável resposta (ver equações 1 e 2). Isso pode ser determinado pelas variáveis que possuem coeficiente positivo, que neste caso são a abertura da fissura controlada, a concentração de NaCl e a corrosão acelerada. Essas equações foram obtidas com os dados usados neste estudo usando o Minitab.

Equação de regressão para o tipo de variável experimental contínua:

$$V_{cm} = 13.0 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (1)$$

Equação de regressão para o tipo úmido-seco da variável experimental:

$$V_{cm} = 17.6 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (2)$$

Considerando assim os estudos realizados até agora, para determinar a influência das variáveis experimentais na variação da carga máxima, que foram o gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído, a análise de variância e as equações de regressão, é possível concluir que a abertura de fissuras controladas é a variável experimental que tem maior efeito sobre a carga máxima em concreto armado com fibras de aço que sofrem degradação por cloretos, embora não existam trabalhos dedicados especificamente ao estudo da influência desta variável na carga máxima.

Em pesquisas como a de Hou et al., (2021) são mostrados resultados contraditórios, pois ao usar $A_g = 0,06$ mm a diminuição da carga máxima é de 23,35%, enquanto para aberturas de fissura de 0,09 mm é de 13,55% e para valores de 0,12 mm a variação é de 30,51%, o que mostra que a variação desta propriedade não depende apenas desta variável. Por outro lado, outra das variáveis com influência na variação da carga máxima conforme os resultados aqui obtidos é a concentração de cloretos, embora esta informação ainda não tenha sido confirmada por falta de informação bibliográfica, em estudos como a de Marcos-Meson et al. (2021) mostra como essa variável influencia negativamente as propriedades dos SFRCs estudados.

3.2. Efeito de variáveis experimentais na variação da resistência residual

Para analisar os dados de variação da resistência residual (V_{rr}) obtidos, foi feito de forma semelhante aos dados de carga máxima de flexão. Foi feito um histograma da variação da resistência residual, onde conforme observado na Figura 4, a maior frequência de variações é de 0 a 17% e de 17 a 34%, portanto esses são os dados que foram tomados. Observa-se também que existem valores abaixo de zero, que não foram utilizados pelos motivos citados, assim como dados superiores a 34%, visto que esses tipos de resultados são raros.

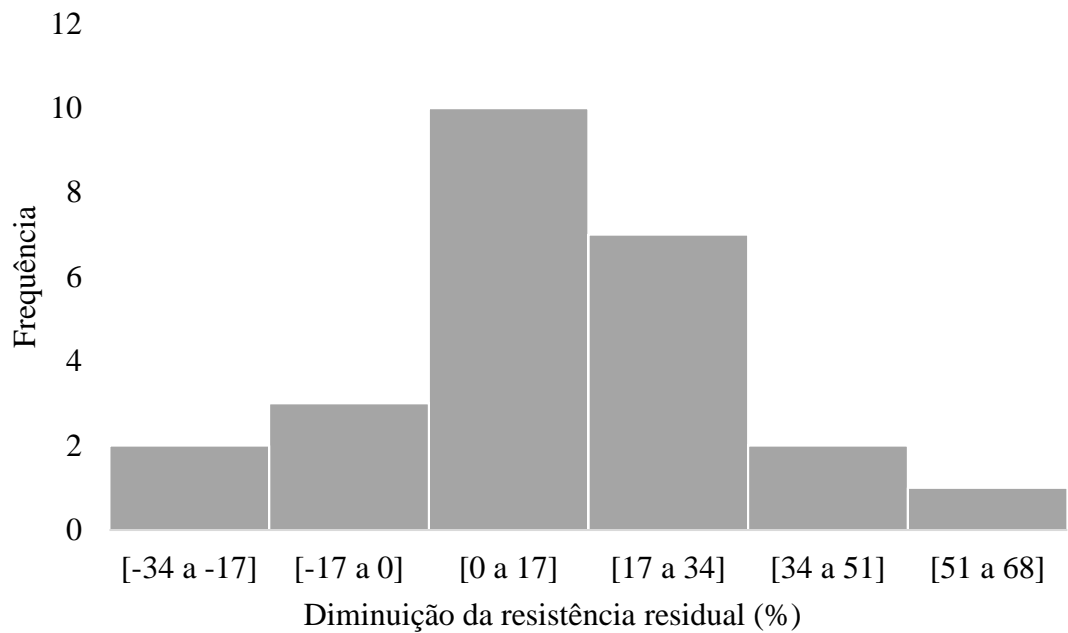


Figura 4. Histograma de variação da resistência residual.

3.2.1. Análise do Gráfico de sinal-ruído

Analisando a Figura 5, é possível determinar que os fatores de controle que reduzem a variabilidade são, em primeiro lugar, a carga de flexão durante a degradação, pois é aquela que apresenta maior tendência vertical no gráfico sinal-ruído.

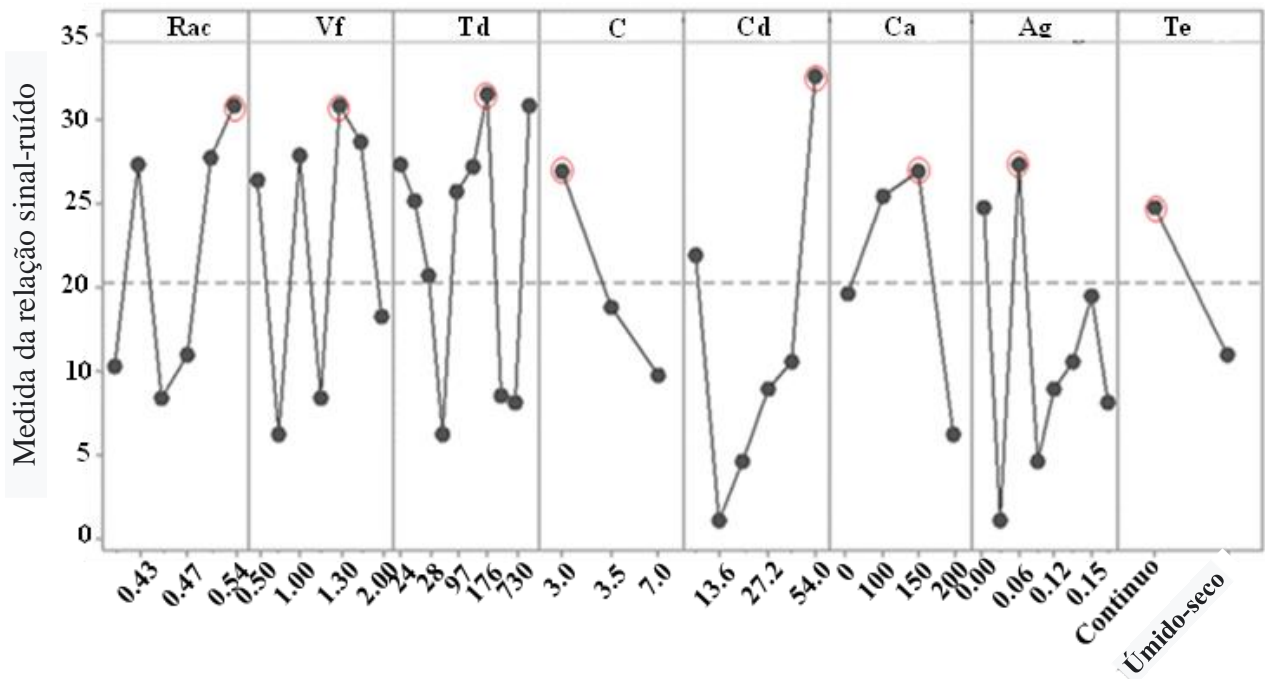


Figura 5. Gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído para experimentos de resistência residual.

Segue-se a relação água/cimento, o volume de fibras, o tempo de degradação e a abertura das fissuras controladas, sendo recomendados em cada caso os seguintes níveis para obter maiores

efeitos na redução da resistência residual: Cd (54 kN) , a/c (0,54), Vf (1,3%), Td (176 dias) e Ag (0,07 mm), respectivamente. Esses valores são obtidos tomando o valor do nível mais alto em cada fator da Figura 5, marcado com um círculo vermelho. Por outro lado, as outras variáveis estão mais próximas da média e têm menos efeito na relação sinal-ruído, porém, para realizar um planejamento experimental a fim de obter também os maiores níveis de variação da resistência residual. em conta. Portanto, no caso de concentração de cloreto, corrosão acelerada e tipo de experimento, os valores recomendados são 3%, 150 uA /cm² e experimento contínuo respectivamente.

3.2.2. Análise de regressão

Foi também realizada uma análise de regressão onde se estudou a análise de variância (Tabela 3), obtendo-se que o valor de p era inferior a 0,05 nas variáveis: carga durante a degradação (0,000) e tipo de experimento (0,002), o que significa que estas variáveis têm maior influência na variação da resistência residual à flexão do que as demais. O referido resultado não é totalmente coincidente com os obtidos no gráfico Sinal/Ruído, pois na referida figura a variável tipo de experimento pouco influencia na variável resposta, sendo este um elemento a ser analisado em estudos futuros.

Tabela 3. Análise de variância das variáveis estudadas para variação da resistência residual.

Variáveis	Valor-p
Relação água/cimento	0,401
Porcentagem de fibra	0,452
Tempo de degradação	0,196
Concentração de NaCl	0,085
Carga durante a degradação	0,000
Corrosão acelerada	0,907
Abertura da fissura	0,081
Tipo de experimento	0,002

Por outro lado, analisando os coeficientes de cada fator nas equações de regressão (ver equações 3 e 4), é possível determinar as variáveis com maior influência na resposta: a carga durante a degradação, a relação água/cimento e o tempo de degradação, o que coincide com os resultados obtidos na Figura 5 e em parte com a tabela 3.

Equação de regressão para o tipo variável de experimento contínuo

$$V_{rr} = 19.5 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (3)$$

Equação de regressão para o tipo úmido-seco da variável experimental

$$V_{rr} = 3.1 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (4)$$

É possível concluir então que, nos estudos de degradação de SFRCs pela ação de cloretos, a variável experimental que tem maior incidência na variação da resistência residual é a carga a que os corpos de prova de concreto são submetidos durante a degradação. Resultados semelhantes foram encontrados por Nguyen et al. (2018), que obtiveram uma diminuição na capacidade de carga do concreto estudado, uma vez fissurado por terem sido submetidos a uma carga mantida enquanto expostos a cloretos, constataram que as fibras de aço sofriam corrosão quando a carga aplicada era superior a 50% da carga de escoamento. Da mesma forma, Hou et al. 2021 constatou que ao aumentar os níveis de carga mantida ao concreto e sob condições severas de corrosão, a capacidade

de carga destes foi afetada. Da mesma forma, a relação água/cimento tem influência marcante na variação da resistência residual, conforme os resultados aqui encontrados, embora não existam atualmente na literatura estudos dedicados a comparar como essa variável influencia nessa propriedade. Por fim, como foi visto, o tempo de degradação também influencia nessa característica, sendo esse resultado contraditório ao obtido por Marcos-Meson et al., 2021, pois obtiveram poucas alterações no desempenho mecânico dos SFRCs degradados por cloretos e dióxido de carbono por 1 e 2 anos. Isso significa que os resultados obtidos neste tipo de estudo permanecem contraditórios e pesquisas futuras são necessárias.

4. CONCLUSÕES

Através da análise dos estudos realizados sobre a degradação do concreto reforçado com fibras de aço pela ação dos cloretos, e tendo em conta as principais variáveis experimentais que afetam as propriedades de resistência residual e carga máxima dos referidos concreto, é possível chegar nas seguintes conclusões:

1. Os resultados encontrados na bibliografia mostram que os processos de degradação por cloretos não só afetam negativamente as propriedades mecânicas do SFRC, mas que, em alguns casos, essas propriedades podem ter uma melhora após a degradação, isso é atribuído a um aumento da ligação resistência entre o concreto e a fibra devido ao aumento da rugosidade da superfície devido à corrosão.
2. Fazendo uma análise dos resultados obtidos para os experimentos onde foi avaliada a variação da carga máxima de flexão, verifica-se que a variável cuja variação mais afeta esta propriedade é a abertura das fissuras controladas, sendo o valor de 0,12 mm o mais afeta a variável de resposta, da mesma forma, ordenando as variáveis de acordo com sua influência na variação da carga máxima suportada pelo SFRC e para obter os maiores valores de perda desta propriedade seria o seguinte: Ag (0,12 mm), Vf (0,75%), Td (72 dias), C (7%), Ca (200 uA /cm²), tipo de experimento (úmido-seco) e a/c (0,47).
3. No caso da resistência residual à flexão, a variável experimental que tem maior efeito sobre esta propriedade é a carga aplicada durante a degradação, verificando-se que sua influência é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a carga, é de se esperar que a resistência residual após o processo de degradação é mais afetada, da mesma forma foi obtida uma ordem de variáveis quanto à influência na resistência residual, pelo que é possível recomendar os seguintes valores de cada variável a utilizar para obter as maiores diminuições nesta propriedade em experimentos de degradação: Cd (54 kN), a/c (0,54), Vf (1,3%), Td (176 dias), Ag (0,07 mm), C (3%), Ca (150 uA /cm²) e tipo de experimento (contínuo). Essas variáveis foram ordenadas da mais influente para a menos influente.
4. Devido aos resultados obtidos, recomenda-se continuar com o estudo da influência de variáveis experimentais com outras propriedades do concreto armado com fibras de aço, como durabilidade, tenacidade e ductilidade, bem como a influência de outras variáveis como o material das fibras, o tamanho e a forma dos corpos de prova de concreto e o tipo de matéria-prima utilizada para sua confecção.

5. REFERÊNCIAS










Abbas, S., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2014), *Mechanical Performance of reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments: A Case Study*, *Aci Materials Journal*, 501-510.

Antony, F., Perry, D., Wang, C., Kumar, M. (2006), *An application of Taguchi method of*

- experimental design for new product design and development process*, Operations and Quality Management Unit, Caledonian Business School, Glasgow Caledonian University, Glasgow, UK, <http://dx.doi.org/10.1108/01445150610645611>.
- Balouch, S. U., Forth, J. P., Granju, J. L. (2010), *Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, 40, 410–414, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.001>.
- Behbahani, H., Nematollahi, B. (2011), *Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*, ICSECM, Kandy-SriLanka.
- Bernard, E. S. (2019), *Durability of fibre-reinforced shotcrete*, TSE P/L, Penrith, Australia, <http://dx.doi.org/10.1201/9780203023389.ch6>.
- Berrocal, C. G., Fernandez, I., Lundgren, K., Löfgren, I. (2017), *Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC*, Composites Part B, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.020>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2015), *Corrosion of Steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art*, Cement and Concrete Research, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2013), *Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review*, Fibre concrete, Prague, Czech Republic.
- Blagojevic, A. (2016), *The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride-Induced Corrosion: A Look from a Different Perspective*, Doctoral Thesis, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
- Bui, L. V. H., Jongvivatsakul, P., Limpaninlachat, P., Stitmannathum, B., Nguyen, T. T., Nguyen, T. P. (2021), *Simulation of shear behavior of corroded reinforced concrete beams flexurally repaired with steel fiber-reinforced concrete*, Structures, 34, 1545–1559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.087>.
- Carrillo, J., Cárdenas, Pulido, J., Aperador, W. (2017), *Propiedades mecánicas a flexión del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes corrosivos*, Revista Ingeniería de Construcción, 32, 59-72.
- Chen, H., Zhou, X., Li, Q., He, R., Huang, X. (2021), *Dynamic Compressive Strength Tests of Corroded SFRC Exposed to Drying–Wetting Cycles with a 37 mm Diameter SHPB*, Materials, 14, 2267, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14092267>.
- Doo-Yeol, Y., Shin, W., Chun, B., Banthia, N. (2021), *Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance*, Cement and Concrete Research, 133, 106091, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima, Neto A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A. J. C, Freire, M. C. (2018), *Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con mantas de PRFC*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 30 – 47, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>.
- Granju, J. L., Balouch, S. U. (2005), *Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*, Cement and Concrete Research, 572– 577, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>.
- Horszczaruk, E. K. (2009), *Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete*, Wear, 267, 110–115, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.010>.
- Hou, L., Peng, Y., Xu, R., Zhang, X., Huang, T., Chen, D. (2021), *Corrosion behavior and flexural performance of reinforced SFRC beams under sustained loading and chloride attack*, 242, 112553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112553>.
- Juárez-Alvarado, C. A., González López, J. R., Mendoza-Rangel, J. M., Zaldivar Cadena, A. A. (2017), *Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico*, Revista ALCONPAT, 7 (2), 135-147, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>.

- Kaur, G., Pal Singh, S. (2012), *Flexural performance of fibrous concrete with cement additions*, Construction Materials, 167, 14-25, <http://dx.doi.org/10.1680/coma.12.00008>.
- Kuehl, R. O. (2000), *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, Arizona.
- Li, H., Li B., Jin, R., Li, S., Yu, J. G. (2018), *Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams*, Construction and Building Materials, 169, 179–187.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A. (2019), *Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review*, Construction and Building Materials, 200, 490–501, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Solgaard, A., Edvardsen, C., Michel, A. (2021), *Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet–Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide*, Materials, 14, 2642, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14102642>.
- Marcos-Meson, V., Geiker, M., Fischer, G., Solgaard, A., Jakobsen, U. H., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A., Danner, T. (2020), *Durability of cracked SFRC exposed to wet-dry cycles of chlorides and carbon dioxide – Multiscale deterioration phenomena*, Cement and Concrete Research, 135, 106120, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106120>.
- Meza, A., Shaikh, F. U. A. (2020), *Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement*, Constr. Build. Mater, 265, 120331, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>.
- Meza, A., Pujadas, P., Meza, L. M., Pardo-Bosch, F., López-Carreño, R. D. (2021), *Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study*, Materials, 14-240, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14020240>.
- Meza, A., Siddique, S. (2019), *Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber*, Construction and Building Materials, 213, 286–291, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>.
- Michel, A., Solgaard, A. O. S., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., Olesen, J. F. (2013), *Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete*, Corrosion Science, 77, 308–321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.019>.
- Nguyen, W., Duncan, J. F., Jen, G., Ostertag, C. P. (2018), *Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete*, Corrosion Science, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.004>.
- Paul, S. C., Van Zijl, G. P., Branko Šavija, B. (2020), *Efect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review*, Materials, 13, 4562, <http://dx.doi.org/10.3390/ma13204562www>.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015), *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*, Tecnología en Marcha, 28, 127-136.
- Simões, Y. S., Santo, C. F. R. (2019), *Contribución de las vigas de concreto armado degradadas por la acción del fuego: Análisis comparativo entre el refuerzo estructural con fibras de carbono y láminas metálicas*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 48 – 64, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.259>.
- Tang, K., Wilkinson, S. (2020), *Corrosion resistance of electrified railway tunnels made of steel fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials, 230, 117006, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117006>.
- Taqi, F. Y., Mashrei, M. A., Oleiwi, H. M. (2021), *Experimental study on the effect of corrosion on shear strength of fibre-reinforced concrete beams*, Structures, 33, 2317-2333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.006>.
- Zhang, P., Kang, L., Wang, J., Guo, J., Hu, S., Ling, Y. (2020), *Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature—A Review*, Applied Sciences, 10, 2324, <http://dx.doi.org/10.3390/app10072324>.

Influência da proporção de areia nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para construção

M. Navarrete-Seras^{1*} , W. Martinez-Molina¹ , H. L. Chavez-Garcia¹ ,
A. Sanchez-Calvillo^{1,2} , M. Arreola-Sanchez^{1,4} , J. A. Borrego-Perez^{1,4} ,
N. A. Perez-Castellanos^{4,5} , R. P. Ruiz-Torres⁶ , A. M. Duran-Ramos¹,
E. M. Alonso-Guzman^{1,3*} 

* Autor de Contato: mnavarrete@umich.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

Recebido: 01/04/2023 | Correções recebidas: 16/04/2023 | Aceito: 19/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

As proporções de areia nas argamassas de tipo II foram analisadas de acordo com a norma N-CMT-2-01-004/02. Foram utilizados três tipos de agregados da região de Morelia, Michoacán para determinar a sua influência nas suas propriedades físico-mecânicas. Considerando a utilização de diferentes materiais cimentícios (CM): cimento Portland mais cimento de alvenaria (B2) e cimento Portland mais cal (B1). Foram preparadas misturas para B1 e B2 com relações areia/MC de 2,25 para 4. Foram determinadas a fluidez, resistência uniaxial à compressão (UCS) e resistividade elétrica úmida (WER). Estudando a relação entre a fluidez e a quantidade de água/MC, concluindo que o tipo de agregado e as proporções modificam a fluidez e a demanda de água no estado fresco com impacto no UCS e no WER.

Palavras-chave: argamassas de construção; resistividade elétrica; agregados finos; resistência mecânica, dimensão das partículas.

Citar como: Navarrete-Seras, M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Sanchez-Calvillo, A., Arreola-Sanchez, M., Borrego-Perez, J. A., Perez-Castellanos, N. A., Ruiz-Torres, R. P., Duran-Ramos, A. M., Alonso-Guzman, E. M. (2023), “*Influência da proporção de areia nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para construção*”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 158 – 174, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.684>

¹ Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

² Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB), Universitat de Lleida, Lleida, Spain, 25002.

³ PIDA, Faculty of Architecture, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040.

⁴ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

⁵ Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, Coyoacán, CDMX, México, 04510.

⁶ Faculty of Architecture, UNACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29050.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a experimentação foi realizada por M. Navarrete-Seras (50%), AM Duran-Ramos (50%); atividade de pesquisa bibliográfica M. Navarrete-Seras (25%), AM Duran-Ramos (25%), A. Sanchez -Calvillo (25%) e EM Alonso- Guzman (25%); atividade de extração de informação por W. Martinez -Molina (20%), JA Borrego- Perez (20%), HL Chavez Garcia (20%), EM Alonso- Guzman (20%) e M. Arreola- Sanchez (20%); análise e discussão dos resultados por M. Navarrete (20%), W. Martinez -Molina (20%), M. Arreola-Sanchez (20%), JA Borrego- Perez (20%) e HL Chavez García (20%) ; a redação do documento por A. Sanchez -Calvillo (20%), NA Perez -Castellanos (20%), RP Ruiz-Torres (20%), W. Martinez -Molina (20%) e M. Arreola- Sanchez (20%); a revisão do texto por AM Duran-Ramos (20%), NA Perez -Castellanos (20%), RP Ruiz-Torres (20%), M. Navarrete-Seras (20%) e EM Alonso- Guzman (20%); o desenho das figuras e a adaptação ao formato por W. Martinez -Molina (25%), HL Chavez-Garcia (25%), M. Arreola- Sanchez (25%) e JA Borrego- Perez (25%); Tradução para o inglês de A. Sanchez -Calvillo (60%), NA Perez -Castellanos (20%) e RP Ruiz-Torres (20%).

Influence of sand proportion in the physical and mechanical properties of construction and building mortars

ABSTRACT

The influence of sand proportion of in mortars Type II was studied according to the standard N-CMT-2-01-004/02. Three different types of fine aggregates from the region of Morelia, in Michoacan, were used to determine their influence in the physical and mechanical properties. Different cementitious materials (CM): Portland cement plus lime (B1), and Portland cement plus construction cement (B2) were considered and mixed. The mortar mixtures were designed for B1 and B2 with different volume ratios of aggregates/CM, from 2.25 to 4. The characterization determined the fluency, the uniaxial compressive strength (UCS) and the wet electrical resistivity (WER). Analyzing the fluency and the ratio water/CM it was concluded that the aggregate properties and their proportions modify the water demand in the fresh state of the mortar and consequently the UCS and WER.

Keywords: construction mortars; electrical resistivity; fine aggregates; mechanical resistance; sieve analysis.

Influencia de la proporción de arena en las propiedades físicas y mecánicas de morteros para la edificación

RESUMEN

Se analizó la influencia de la proporción de arena en morteros Tipo II según norma N-CMT-2-01-004/02 empleando tres tipos de áridos de la región de Morelia, Michoacán determinando su influencia en sus propiedades físico-mecánicas, contemplando el uso de diferentes materiales cementantes (MC): el cemento Portland más cal (B1), cemento Portland más cemento de albañilería (B2). Se elaboraron mezclas para B1 y B2 con relaciones en volumen arena/MC, desde 2.25 hasta 4, determinando la fluidez, resistencia a compresión uniaxial (UCS) y resistividad eléctrica húmeda (WER). Se estudió la relación entre la fluidez y la cantidad de agua/MC, concluyendo que el tipo de árido y proporciones modifican la fluidez y demanda de agua en estado fresco impactando en UCS y WER.

Palabras clave: morteros de construcción; resistividad eléctrica; agregados finos; resistencia mecánica, granulometría.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

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

Historicamente, edifícios residenciais e casas foram construídos com diferentes materiais de construção, como rochas regulares e irregulares, tijolos cerâmicos, madeira ou blocos de terra crua, entre muitos outros. Estas paredes e pavimentos costumam ter tanto argamassas colantes para alvenaria como de revestimento para revestir estes sistemas (Álvarez Galindo et al., 1995). As argamassas são misturas que incorporam ligantes inorgânicos, agregados, água e outros elementos utilizados como aditivos. Os principais objetivos desses sistemas são unir os elementos de construção, preencher os espaços vazios como agentes de vedação e proteger as superfícies e os diferentes sistemas de agentes externos (Sánchez Tizapa et al., 2017; Wu et al., 2021).

Na Roma Antiga, os recipientes onde eram transportadas as misturas de pasta de cal e areia costumavam ser chamados de “mortarius”, e com o tempo o termo derivou para a atual “argamassa” (“mortero” em espanhol) com a qual o elemento é designado. Encontramos os primeiros registros da menção de argamassas em Vitruvio, que detalha o processo de seleção e produção de calcário para uso na construção (Navarro-Mendoza et al., 2023). Esses sistemas tradicionais foram utilizados durante séculos para a construção de fundações, paredes portantes, pavimentos e revestimentos de todos os tipos, até a popularização do cimento Portland (Álvarez Galindo et al., 1995; Navarro-Mendoza et al., 2020).

As argamassas tiveram vários usos na construção ao longo do tempo; por exemplo, em edifícios podem ser utilizadas pelas suas propriedades térmicas e acústicas, também para prevenir a proliferação de fauna ou flora nocivas ou problemáticas, ou ainda para atingir determinadas propriedades estéticas. No que diz respeito à sua função adesiva, as argamassas necessitam de uma resistência mecânica adequada para permitir que as alvenarias dos elementos estruturais suportem as cargas necessárias. Antes do surgimento do cimento da construção moderna, no México, artesãos e construtores costumavam adicionar cal à mistura para aumentar os tempos de utilização e aplicação das argamassas. A cal tinha a função de reter a água para permitir a hidratação adequada e a cura interna. Este tipo de mistura, resultado da experiência nos trabalhos, é denominado argamassa terciária, devido aos três elementos utilizados: cimento, cal e agregados. Atualmente, o cimento de alvenaria substituiu significativamente o uso de cal com cimento Portland.

A argamassa é um produto fácil de fazer, pois os elementos necessários (água, ligantes e areia) para fazer a mistura são acessíveis e a aplicação do sistema é simples. No entanto, os usuários têm subestimado a importância do uso de proporções adequadas dos componentes, e essa situação tem gerado problemas como diminuição da resistência e aderência, deterioração estrutural ou contração que causa o aparecimento de fissuras que reduzem a vida útil das argamassas (Jacques et al., 2023; Li et al., 2023). Em muitos casos, as propriedades físicas e mecânicas dos agregados das jazidas são desconhecidas, com os preços mais baixos determinando a seleção do material.

A classe e as proporções utilizadas dos materiais que compõem as argamassas influenciam nas propriedades no estado fresco (Giordani & Masuero, 2019) e, conseqüentemente, no comportamento no estado endurecido (Haach et al., 2011). Uma das características mais desejadas durante o estado fresco é a trabalhabilidade, que deve ser adaptada às exigências de execução dos revestimentos ou acabamentos para garantir uma boa aderência à superfície (Ribeiro & Oliveira Rey, 2019; Tena et al., 2017). Alguns elementos que afetam diretamente as propriedades da argamassa são as matérias-primas como a areia e sua qualidade. Por esse motivo, a análise reológica é essencial para determinar se os agregados atendem às normas estabelecidas e se suas qualidades estão afetando a viscosidade e a trabalhabilidade das argamassas (Denish & Ozbakkaloglu, 2023; Li et al., 2022; Westerholm et al., 2008).

Normalmente, os agregados miúdos (FA, sigla em inglês) representam cerca de 35% do volume total da argamassa, sendo um dos componentes mais importantes da mistura. Portanto, o uso de diferentes tipos de areia com geometrias irregulares e uma distribuição granulométrica ineficiente

pode resultar na deterioração das propriedades de trabalhabilidade, reduzindo a densidade e aumentando a área superficial específica, fazendo com que a pasta reduza sua espessura (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). A morfologia dos agregados miúdos também desempenha um papel importante nas propriedades físicas da argamassa devido ao impacto direto na reologia (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

Vários estudos têm procurado analisar a importância dos FAs e sua substituição parcial em argamassas. Foi relatado como o uso de agregados miúdos aumentou a viscosidade plástica das argamassas em 30% (Hu, 2005); outras investigações compararam o efeito no desempenho de argamassas de cimento Portland com a adição de geopolímeros com partículas residuais de vidro (Gao et al., 2022); o efeito da carbonatação também foi estudado adicionando diferentes materiais residuais com propriedades cimentícias e/ou pozolânicas em substituição ao cimento Portland, determinando se eles podem limitar ou melhorar a carbonatação das misturas após o endurecimento (Martinez-Molina et al., 2021).

Outros trabalhos pesquisaram a adequação do plástico reciclado como substituto do FA, relatando uma redução de 10 a 20% na resistência à compressão e tensão direta (Ullah et al., 2021). A influência da adição de fibras também foi analisada nas propriedades no estado fresco, na deformabilidade e no comportamento mecânico (Brazão Farinha et al., 2021); além disso, também foram estudados os efeitos de adições como sílica ativa, superplastificantes e a relação água/aglomerante (Senff et al., 2009). A substituição parcial da massa de cimento Portland por carbonato de cal em pó (0, 9, 16, 23 e 30%) também tem apresentado comprometimento nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade (Souza et al., 2020), bem como tais como casca de ovo triturada (Beng Wei et al., 2021), ou pozolanas naturais (HAMMAT et al., 2021).

O problema descrito em torno da importância dos agregados miúdos nas argamassas, aliado à ambiguidade descrita nas normas mexicanas (NMX-C-486-ONNCCE-2014 e N-CMT-2-01-004/02) em relação às proporções de cimento e água para a correta trabalhabilidade da argamassa, dão origem a este trabalho de pesquisa. Deve-se levar em conta que esta pesquisa foi realizada com jazidas de agregados finos de uma determinada área do México (Morelia). A importância deste trabalho está em visualizar as diferenças que podem existir na trabalhabilidade e no estado endurecido da argamassa ao utilizar diferentes jazidas de agregados na mesma área, além da confiabilidade e qualidade da argamassa atualmente utilizada como revestimento estrutural.

A presente investigação centra-se no estudo de toda a gama de relações cimento/areia que as referidas normas permitem, para determinar a quantidade máxima de areia que pode ser utilizada para produzir uma argamassa para uso estrutural, para além de estudar três tipos de areias naturais, FA, com diferentes dosagens de cimento hidráulico (cimento Portland), cimento de alvenaria e cal, para analisar a influência da proporção de areia nas propriedades físico-mecânicas. Essas misturas foram caracterizadas com técnicas de análise não destrutivas e com ensaios mecânicos como resistência à compressão; avaliar as melhores misturas com base nos requisitos das regulamentações nacionais e internacionais. Tudo isto, com o objetivo de aumentar o conhecimento técnico e científico sobre as argamassas habitualmente utilizadas na edificação e construção de infraestruturas, de forma a conseguir um impacto positivo na sua qualidade e durabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As argamassas foram concebidas para serem aplicadas no interior e no exterior de edifícios, nomeadamente para utilização em habitações de autoconstrução. A norma N-CMT-2-01-004/02 para argamassas de alvenaria define três classes: I, II e III, dependendo dos componentes e dos valores mínimos de resistência mecânica. Os traços foram elaborados para argamassas Tipo II, sendo combinações volumétricas de cimento hidráulico, cimento de alvenaria e cal, com diferentes quantidades de areia para determinar o melhor desempenho. A proporção de areia em nenhum caso

foi inferior a 2,25 ou superior a 4 vezes a soma dos materiais cimentícios em volume, conforme indicado pelas normas acima mencionadas.

Para esta pesquisa, toda a parte experimental foi realizada no laboratório de materiais “Ing. Luis Silva Ruelas”, da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade de Michoacana, começando pelo controle de qualidade de todos os materiais individualmente. Foi utilizado o cimento CPC 30R RS, segundo NMX-C-414-2017-ONNCCE, que é classificado como Tipo II segundo ASTM C150-C150M-22 (ASTM International, 2022c). Por outro lado, a cal está em conformidade com ASTM E1266-20 (ASTM International, 2020b). As areias foram coletadas em jazidas da região de Morelia, de Michoacán, no México, e analisadas em laboratório, sempre como a média de três ensaios. A caracterização física das areias foi realizada de acordo com o que indicam as normas internacionais da American Society of Testing. Materials (ASTM) e a Organização Nacional de Normalização e Certificação de Construção e Construção (ONNCCE) do México.

Uma vez feitos os traços, foi determinada a fluidez no estado fresco, e depois de endurecidas foram ensaiadas para obter as propriedades mecânicas como a Resistência à Compressão Uniaxial (UCS) considerando a resistência mínima de projeto de 75 kgf/cm^2 exigida pela norma NMX-C-486-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014); outras características foram extraídas por meio de Ensaios Não Destrutivos (NDT), como a Resistividade Elétrica Úmida (WER) aos 7 e 28 dias de idade.

2.1 Estudo de traço

Todas as amostras de argamassa Tipo II, de acordo com a norma, foram preparadas em condições de laboratório com diferentes dosagens volumétricas de cimento hidráulico, cimento de alvenaria e cal e areia conforme tabela 1. Todas as misturas foram mantidas na faixa de trabalhabilidade 105-130% (ONNCCE, 2015b). Posteriormente, foram curados por imersão em água conforme indicado na norma ASTM C31-C31M-22 (ASTM 2022a), sendo a água obtida da rede pública do campus da UMSNH. Metade das argamassas (B1) foram preparadas com cimento hidráulico, cal e areia, moldando-se 6 corpos de prova para cada um dos 8 traços diferentes, obtendo-se 48 corpos de prova; enquanto a outra metade (B2) incorporou cimento hidráulico, cimento de alvenaria e areia, atingindo a mesma quantidade de 48 corpos de prova de (B1), para obter um total de 96 corpos de prova a serem ensaiados, primeiro obtendo WER de forma não destrutiva e depois de forma destrutiva até falha para obter UCS.

Tabela 1. Traços em volume.

ID	Cimento Hidráulico (Cimento Portland)	Cimento para Alvenaria (Cimento para Construção)	Cal	Areia
B1	1	-	½	2,25, 2,5, 2,75, 3, 3,25, 3,5, 3,75, 4
B2	1	1	-	2,25, 2,5, 2,75, 3, 3,25, 3,5, 3,75, 4

2.2 Caracterização e propriedades dos agregados miúdos

As areias foram extraídas de jazidas de materiais no estado de Michoacán, no México. O estado está localizado no Eixo Neovulcânico, onde há uma grande quantidade de rochas ígneas extrusivas e materiais de origem siliciosa, como agregados fluviais ou areias quartzosas. Os três agregados utilizados para a investigação são areias naturais não britadas. Primeiro, a margem “El Coro” (CH) do município de Zinapécuaro, próximo ao Lago Cuitzeo, na latitude 19,893889 e longitude -100,875833; depois, a margem “El Cuervo” (R), do rio Huajúbaro na depressão de Balsas, na latitude 19.626110 e longitude -100.636667; finalmente, o banco "Joyitas" (J), em Morelia, na latitude 19.727222 e longitude -101.385278. As três areias são mostradas na figura 1.



Figura 1. Areias: (a) Areia vulcânica Joyitas (J); (b) Areia siltosa de El Coro (CH); (c) Areia do rio El Cuervo (R). Fonte: (Durán, 2021; Durán, 2021; Mondragón, 2021).

As areias foram amostradas nas referidas jazidas e transportadas para o laboratório de materiais para análise. Primeiramente, foram secas e preparadas como amostras representativas (100 kg) para iniciar o processo de dimensionamento da argamassa. Os geomateriais não possuem o mesmo rigoroso controle de qualidade que o cimento possui, devido a sua origem natural; em vez disso, é comum que as argamassas sejam produzidas com base na experiência de usuários, artesãos e construtores. A Tabela 2 apresenta o conjunto de métodos de caracterização que foram aplicados às três areias utilizadas na pesquisa antes da confecção das argamassas (ASTM International, 2017, 2018, 2019b, 2022b; ONNCCE, 2004, 2006, 2020).

Tabela 2. Métodos de ensaio aplicados aos agregados de cada jazida de materiais

Método de ensaio	Norma	R areia de rio	CH areia siltosa	J areia vulcânica
Standard Practice for Sampling Aggregates (kg)	ASTM D75/D75M-19	100	100	100
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (g/cm ³)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	2.22	2.13	2.40
Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (%)	ASTM C128-22 NMX-C-165-ONNCCE	7.02	5.92	4.75
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-073-ONNCCE	1.18	1.23	1.36
Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (g/cm ³)	ASTM C29/C29M-17a NMX-C-084-ONNCCE	1.28	1.36	1.42
Standard Specification for Concrete Aggregates	ASTM C33-C33M-18	3.51	2.98	3.87

* Densidade e absorção foram separadas na tabela acima, mas correspondem aos mesmos padrões.

Foi calculada a densidade aparente das areias, com resultados muito semelhantes para as três (ASTM, 2017); por outro lado, CH apresentou um coeficiente de absorção maior que 7%, enquanto o de J foi de 4,75%, sendo este um aspecto relevante. Essa condição pode ter efeito direto nas propriedades da argamassa, aumentando a demanda de água e consequentemente diminuindo a resistência à compressão.

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas das diferentes areias, representando os limites inferior e superior de projeto (ASTM International, 2018), mostrando como R se adapta perfeitamente às curvas propostas; por outro lado, CH apresenta um excesso de material fino na faixa de aproximadamente 0,1 a 0,4 mm, enquanto J ultrapassa ligeiramente o limite inferior. Estas condições podem ter consequências nas propriedades das argamassas como a fluidez e a necessidade de água no estado fresco, como se pode ver mais adiante nas figuras 6 e 7.

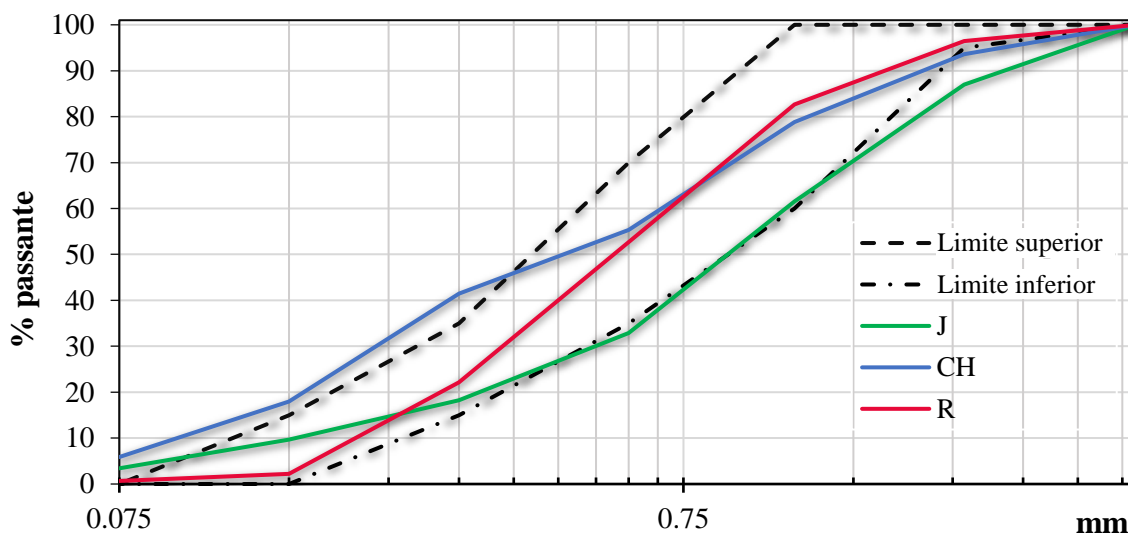


Figura 2. Curvas granulométricas dos agregados.

2.3 Métodos de ensaio aplicados a misturas de argamassa

A Tabela 3 apresenta o conjunto de métodos de ensaio e ensaios realizados para a caracterização das misturas de argamassa no estado fresco e endurecido. Ambas as normas internacionais e mexicanas (ASTM e ONNCCE) foram seguidas para analisar as duas combinações de misturas. Além disso, os três métodos de ensaio e seus procedimentos serão detalhados na seção a seguir (ASTM International, 2019a, 2020a, 2021; ONNCCE, 2014, 2015a, 2019).

Tabela 3. Métodos de ensaio aplicados a argamassas.

Métodos de ensaio	Norma	Condições
Tensão Compressiva Uniaxial (UCS)	ASTM C109/C109M-21 NMX-C-486-ONNCCE-2014	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Resistividade elétrica úmida (WER)	ASTM C1876-19 NMX-C-514-ONNCCE-2016	Cubos sólidos 5x5x5 cm ³
Consistência de misturas e pastas para argamassa de cimento Portland	ASTM C305-20 NMX-C-061-ONNCCE-2015	Misturar em estado fresco

2.3.1. *Trabalhabilidade*

O ensaio de espalhamento (ver figura 3) permite determinar a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco em função do teor de água utilizado, de acordo com a equação 1. O ensaio permite inferir a consistência da mistura, bem como a idoneidade da aplicação para cada técnica. Os limites de aceitação do ensaio variam entre 105-130%, que é o aumento do diâmetro da argamassa estendida em relação ao diâmetro original da argamassa ensaiada.

$$\text{Espalhamento (\%)} = \frac{\text{diâmetro estendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \times 100 \quad (1)$$



Figura 3. Ensaio em misturas de argamassa: (a) Moldagem; (b) Consistência; (c) Aderência. Fonte: (Durán, 2021).

2.3.2. *Resistividade elétrica úmida (WER)*

O WER é um método alternativo para avaliar a homogeneidade de matrizes de concreto, permitindo obter informações relevantes sobre o desempenho do material sem comprometer fisicamente a estrutura, sendo um END. O ensaio foi realizado de acordo com as normas NMX-C-514-ONNCCE e ASTM C1876-19 (ver figura 4). O procedimento é baseado na Lei de Ohm, que indica que a resistividade elétrica é recíproca da condutividade, sendo uma propriedade volumétrica dos materiais que indica resistência à passagem de corrente elétrica. WER é representado pela equação 2, onde R é a resistividade elétrica em kΩ -cm, l é o comprimento do corpo de prova em cm e A é a área em cm².

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$



Figura 4. Equipamento de resistividade elétrica Nillson 400.

2.3.3. *Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)*

O objetivo deste ensaio é determinar a resistência à compressão uniaxial de amostras cúbicas de 50 mm (ver figura 5) de acordo com as normas NMX-C-486-ONNCCE e ASTM C109/C109M-21. O UCS é obtido pela equação 3, onde W é a carga máxima em kgf suportada pelo cubo, e A é a área de contato em cm² do corpo de prova.

$$UCS = \frac{W}{A} \quad (3)$$



Figura 5. Máquina de Ensaio Universal, Resistência à Compressão Uniaxial (UCS).

3. RESULTADOS

A pesquisa analisou as propriedades de três jazidas de areia em misturas de argamassa e suas diferentes proporções. A Figura 6 mostra a comparação entre a espalhamento das misturas com os três agregados e a relação volumétrica entre teor de água/material cimentante aplicado em cada um dos corpos de prova de argamassa B1. Como pode ser visto, CH e J usaram a mesma quantidade de água (as curvas se sobrepõem), enquanto R precisou de uma quantidade menor, coincidindo com (Hu, 2005). Por outro lado, a figura 7 mostra os resultados para argamassas classe B2; neste caso, cada uma das areias exigiu uma dosagem diferente de água e até a proporção 3,25 a quantidade de água requerida por R também foi a menor, correspondendo a (Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021). Conforme mencionado anteriormente, os limites de espalhamento devem estar na faixa entre 105 e 130%, com todas as amostras atendendo a esse requisito. Para ambas as classes de argamassas, verificou-se que quanto maior a proporção de areia, maior a relação água/material cimentício, concordando com a pesquisa de (Giordani & Masuero, 2019).

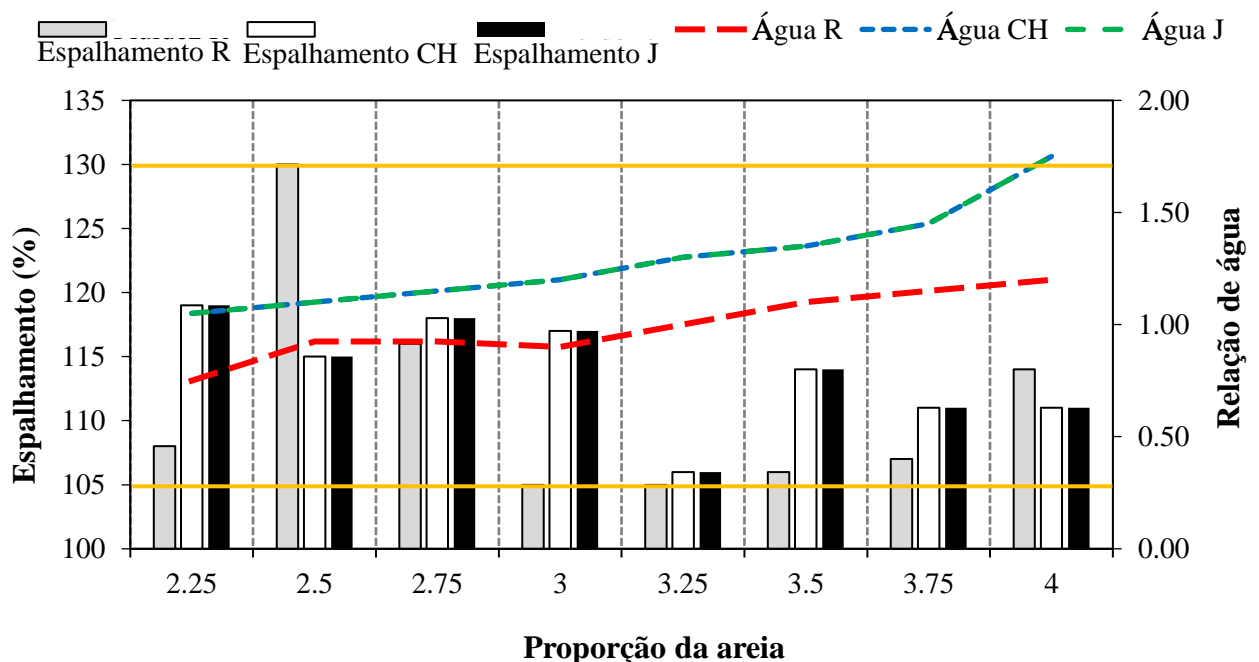


Figura 6. Espalhamento e relação volumétrica água/agentes cimentantes de argamassas B1 (cimento hidráulico: cal: areia).

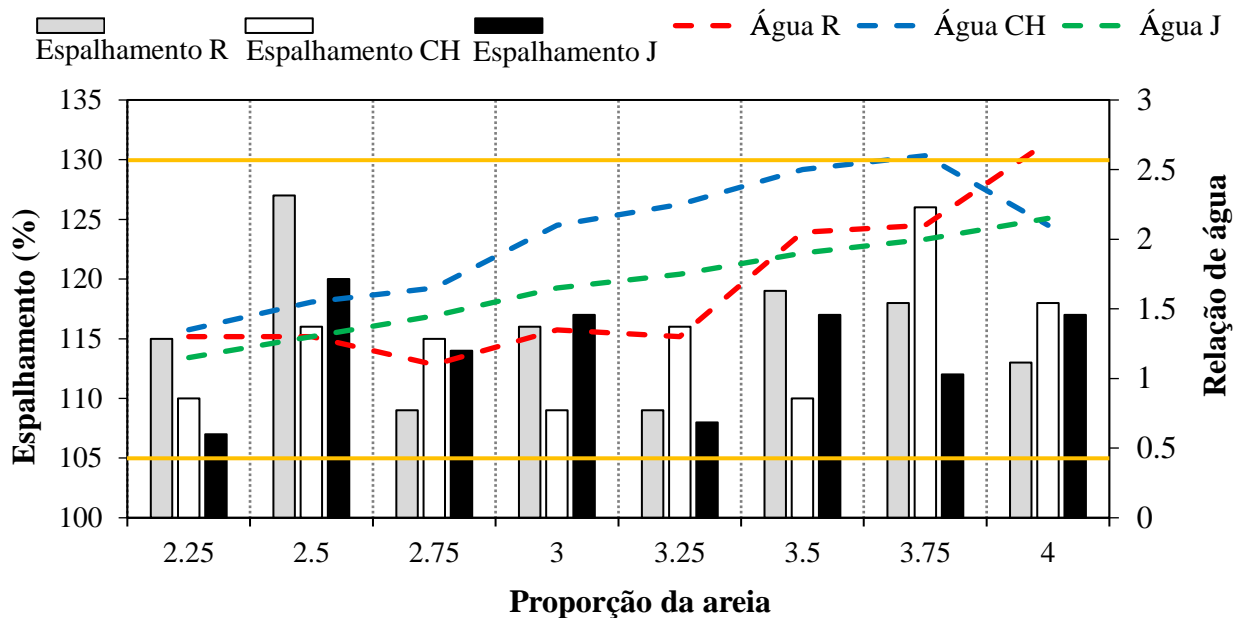


Figura 7. Espalhamento e relação volumétrica água/agentes cimentantes de argamassas B2 (cimento hidráulico: cimento de alvenaria: areia).

As Figuras 8 e 9 representam os resultados do ensaio WER aos 7 e 28 dias de idade para as amostras B1 e B2, respectivamente; pode-se verificar o desempenho das três areias e como se comportaram com as diferentes misturas de argamassa. O limite mínimo sugerido pela norma NMX-C-514-ONNCCE-2019 é de 10 kΩ -cm, para misturas de concreto; um valor menor poderia resultar em porosidade excessiva, como ocorreu em todos os casos analisados. Tanto para as argamassas B1 quanto para as B2, as misturas com a areia CH foram as que apresentaram maior resistividade elétrica, destacando-se a maior resistividade nas misturas B2.

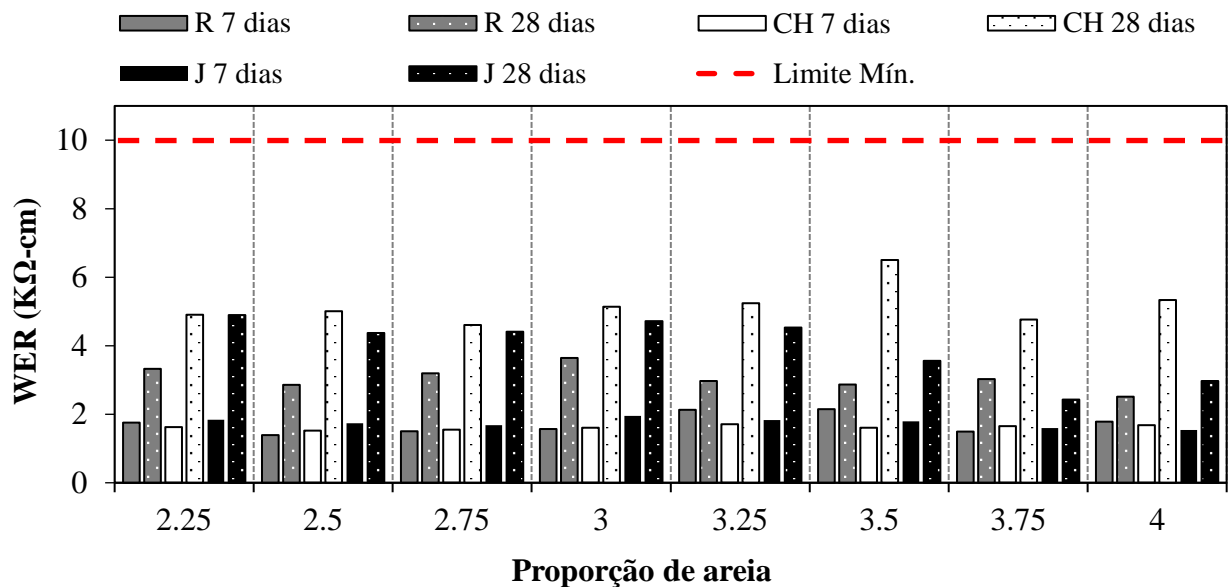


Figura 8. Resistividade elétrica úmida (WER) de argamassas B1 (cimento hidráulico: cal: areia) em função da proporção de areia.

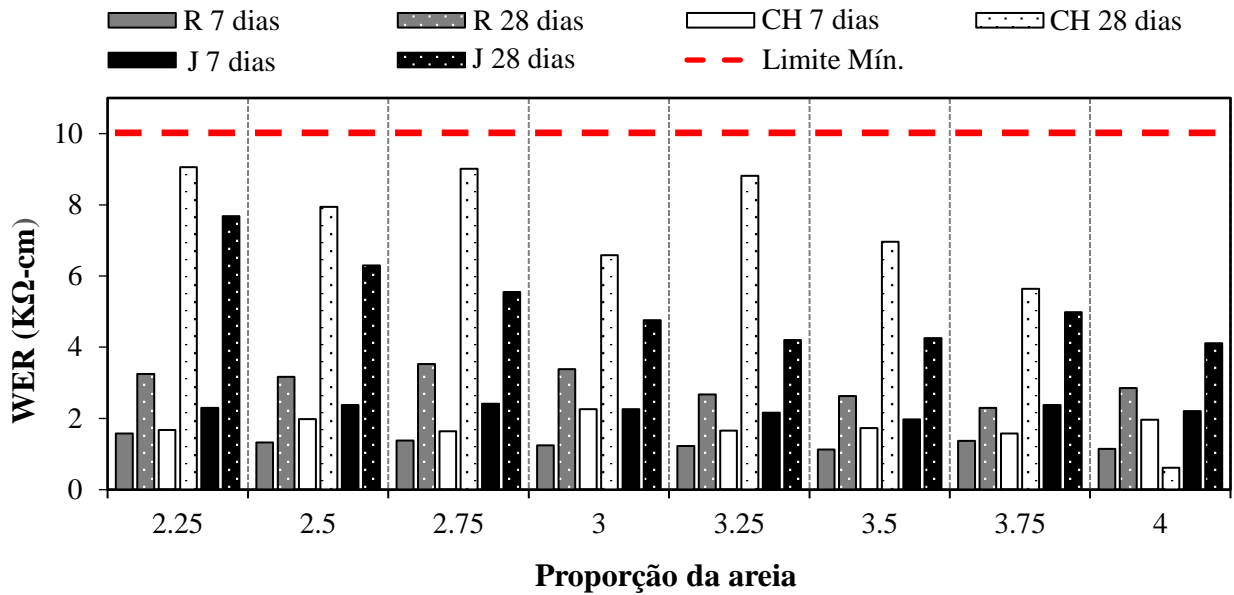


Figura 9. Resistividade elétrica úmida (WER) de argamassas B2 (cimento hidráulico: cimento de alvenaria: areia) em função da proporção de areia.

As Figuras 10 e 11 mostram o UCS aos 7 e 28 dias de idade das argamassas B1 e B2 respectivamente, dependendo das proporções volumétricas utilizadas (de 2,25 a 4). A resistência mínima de projeto conforme N-CMT-2-01-004/02 é $UCS = 75 \text{ kgf/cm}^2$ (7,5 MPa), considerando o uso e aplicações dessas argamassas.

Como se esperava, as argamassas aumentam a sua resistência com uma idade mais avançada, sendo que as amostras aos 28 dias apresentaram os maiores valores de resistência estudados. De maneira geral, as proporções volumétricas de 2,25 a 3 (areia/soma de agentes cimentantes) foram as que melhor funcionaram, pois para B1 para valores maiores que 3,25 nenhuma das misturas atendeu a resistência mínima exigida de 75 kgf/cm^2 . Podemos observar como as argamassas B1 tiveram melhor desempenho, com maior número de corpos de prova atingindo a resistência mínima, conforme relatado por (Souza et al., 2020; Beng Wei et al., 2021; HAMMAT et al., 2021). Para as argamassas B1 o melhor agregado foi o R, enquanto para as argamassas B2 foi o J.

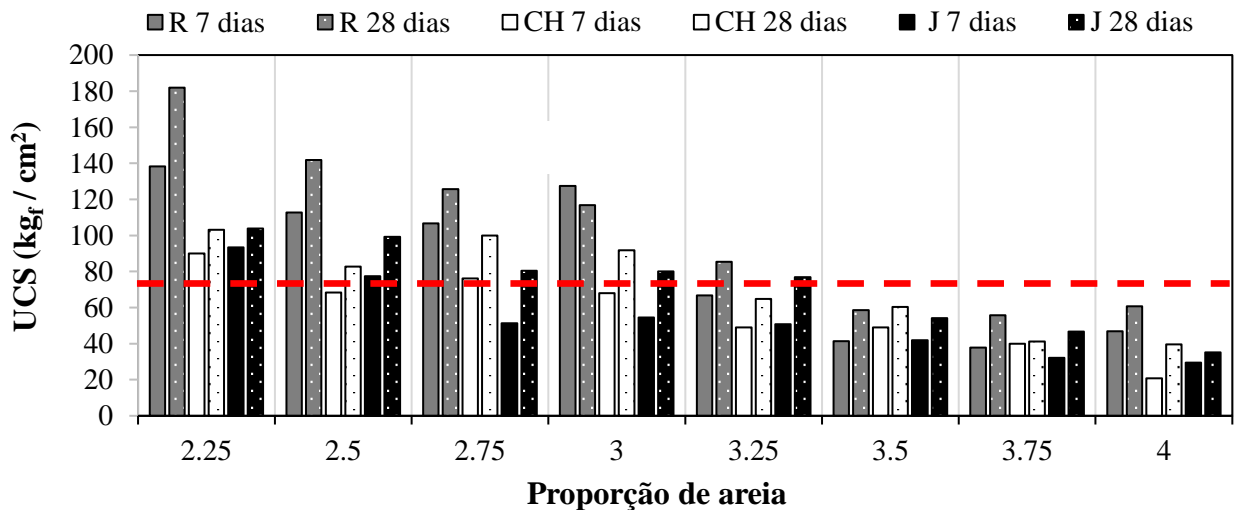


Figura 10. Resistência à compressão das argamassas B1 em função da relação volumétrica areia/materiais cimentícios.

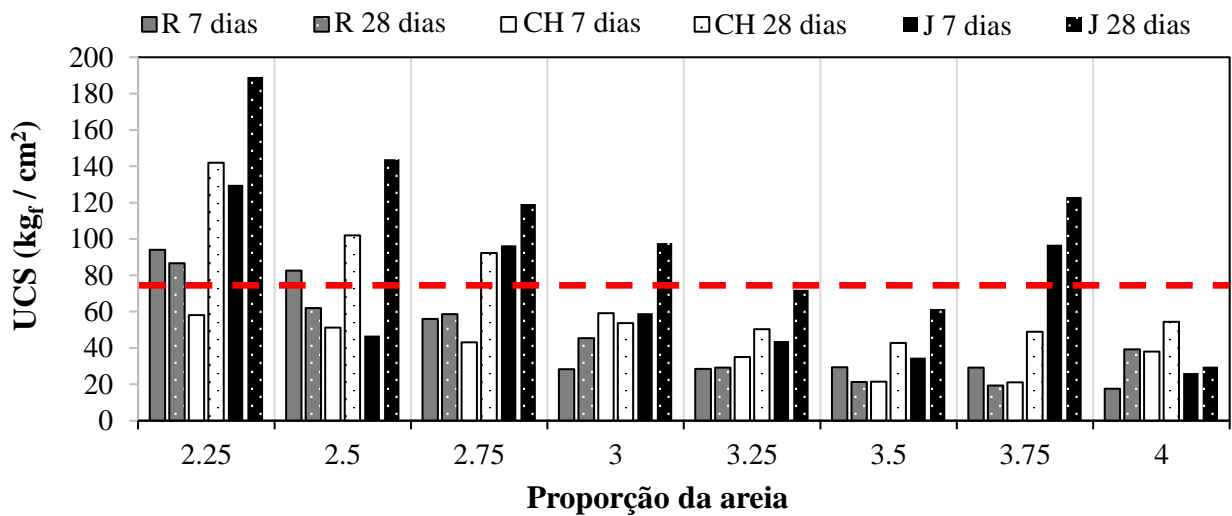


Figura 11. Resistência à compressão de argamassas B2 em função da proporção volumétrica areia/materiais cimentícios.

A Figura 12 mostra a correlação entre os resultados de UCS e WER aos 28 dias de idade para todas as argamassas projetadas. O agregado J é o que obteve o melhor coeficiente de correlação $R^2 = 0,87$ para argamassas classe B2 e $R^2 = 0,82$ para argamassas classe B1. Essa grande correlação entre os métodos de ensaio pode estar ligada à baixa absorção e alta densidade do material, além de sua distribuição correta mostrada na curva granulométrica conforme especificado pela norma ASTM C-91. Por outro lado, R e CH apresentaram a menor correlação, principalmente a última. Essas argamassas apresentaram maior absorção e maior quantidade de material fino na análise granulométrica, o que aumenta a demanda de água e consequentemente a relação água/material cimentício, conforme relatado por (Haach et al., 2011).

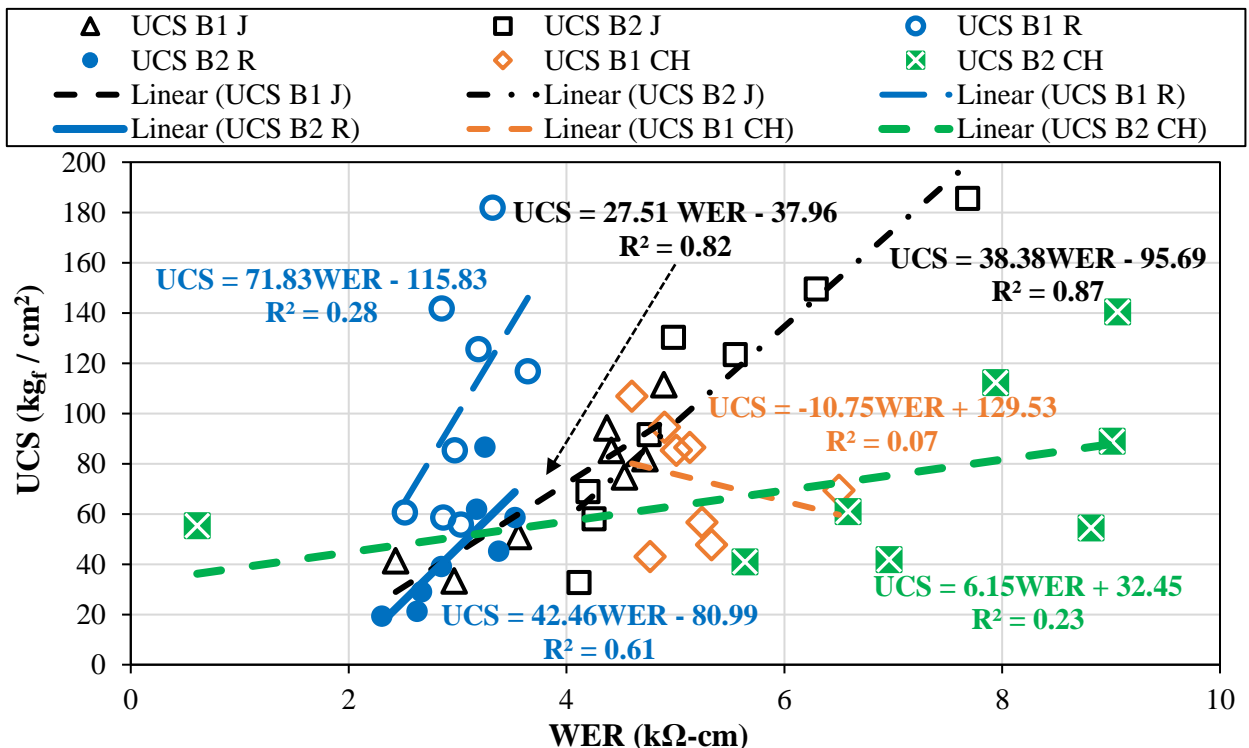


Figura 12. Correlação entre UCS e WER aos 28 dias de idade.

4. DISCUSSÃO

A jazida Joyitas (J) tem sido historicamente a mais explorada e procurada por artesãos e construtores da região próxima a Morelia, em Michoacán. Essa areia vulcânica escura, de origem andesítica segundo as análises granulométricas, apresenta maior quantidade de material fino e um leve excesso de grãos grossos que ficam retidos nas malhas ASTM 16 e 30, gerando melhor comportamento mecânico em relação aos outras duas jazidas. Além disso, J apresentou maiores valores de densidade e menor absorção de água, justificando a escolha dos usuários da região.

O processo de caracterização permitiu avaliar as três diferentes areias e determinar como se comportam para cada tipo de argamassa (B1 e B2) e em que proporções se obtêm os melhores resultados. É importante entender que, além de atender aos requisitos mínimos de projeto, cada mistura pode ser útil em condições específicas. A resistividade elétrica é um novo NDT para avaliar a durabilidade de concretos e argamassas, além de inferir a porosidade, enquanto todas essas informações podem ser correlacionadas com a análise granulométrica e granulometria das areias estudadas. Sob esta hipótese, a areia CH apresentou os maiores valores de resistividade elétrica, ao mesmo tempo em que relatou quantidades consideráveis de finos retidos nas malhas ASTM 100 e 200, e estes atuam como cargas/preenchedores de poros, selando a porosidade das misturas e dificultando a permeabilidade de íons despassivantes que poderiam reduzir a durabilidade de estruturas mistas de concreto armado/argamassa, contribuindo para o que foi relatado por (Giordani & Masuero, 2019; Haach et al., 2011; Durán Ramos, 2021; Ren et al., 2021).

As menores proporções de areia alcançaram o melhor comportamento mecânico, atendendo corretamente aos valores de projeto para espalhamento. Em relação à resistividade elétrica, todos os valores encontrados foram abaixo de 10 k Ω -cm de acordo com a NMX-C-514-2019, embora este parâmetro seja para misturas de concreto, pois as argamassas foram projetadas com altos valores de água/material cimentício, conforme pode ser observado nas figuras 8 e 9, devido à necessidade de se ter um espalhamento necessário para a correta trabalhabilidade das argamassas em obra, lembrando que seus benefícios devem estar voltados para uma boa aderência com a alvenaria, seja como adesivo ou como revestimento. Adicionalmente, constatou-se que a proporção de areia tem correlação direta com a demanda de água, resultando em aumento da relação água/material cimentício. Portanto, as melhores e mais adequadas argamassas são aquelas com baixas proporções de areia independente de sua tipologia e produtos cimentícios, de acordo com (Hafid et al., 2016; Stolz & Masuero, 2018). É interessante verificar como as argamassas B1 obtiveram desempenho satisfatório para todos os métodos de ensaio, tendo em vista que foram feitas com cal, material que tem sido relatado como de baixa resistência (Souza et al., 2020) e regularmente substituído por cimento hidráulico ou cimento Portland. Apesar do seu comportamento mecânico ser inferior, as misturas B1 requerem geralmente menos água do que as misturas B2, ao mesmo tempo que atingem os mesmos requisitos de espalhamento, sendo este um aspecto a considerar.

A técnica WER tem se mostrado muito útil para a caracterização de materiais e componentes e avaliação de sua durabilidade. Os excelentes coeficientes de correlação R^2 de J mostram como a densidade, a resistividade elétrica e a resistência mecânica se correlacionam em alto grau. O coeficiente entre UCS e WER está fortemente ligado à absorção e densidade dos agregados miúdos; quando essas duas variáveis aumentam, o coeficiente varia fortemente, com importante dispersão dos dados. Por esta razão, é essencial combinar NDT com ensaios de resistência mecânica para ter uma melhor compreensão dos materiais de construção.

De acordo com a normatização, o MF para a areia utilizada em argamassas de construção está entre a faixa de 1,6 a 2,5 (do mais fino ao mais grosso). As três areias estudadas cumprem este parâmetro. De acordo com a granulometria, a areia de El Coro (CH) apresenta o menor Módulo de Finura das três areias estudadas, com valor de 2,06, apresentando também um leve excesso de finos, conforme

Figura 2, o que pode influenciar se estes se comportam como fíler, obstruindo a porosidade e, portanto, aumentando a resistividade nas misturas B1 e B2, impactando assim em uma maior durabilidade desta argamassa aos 28 dias, acentuando esse comportamento nas misturas B2.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que nas argamassas estudadas a quantidade de água utilizada aumenta à medida que aumenta o consumo de materiais cimentícios e agregados miúdos, conforme esperado. Em ambas as misturas B1 (cimento hidráulico: cal: areia) e B2 (cimento hidráulico: cimento para alvenaria: areia), ao reduzir a relação volumétrica areia/material cimentício, a resistência à compressão do UCS aumentou, assim como o espalhamento obtido permaneceu na faixa de 105 a 130%; no mesmo sentido, o consumo de água/material cimentício A/MC, em volume, aumentou proporcionalmente na faixa de 1,10 a 1,80 para as misturas B1 e de 1,10 a 2,60 para as misturas B2, com menor demanda de água nas misturas com cal do que com cimento de alvenaria, especialmente em proporções maiores de areia. Em relação à resistividade elétrica do WER, nas primeiras idades de 7 dias, ambas as misturas B1 e B2 tiveram comportamento semelhante, com leve aumento de J em relação a CH e R; aos 28 dias CH se destaca, principalmente nos traços B2, com a relação areia/material cimentício de 2,25 valor próximo a 10 kΩ -cm, que é a REA mínima necessária para que se tenha traços de concreto hidráulico a serem considerados com velocidade de corrosão moderada. Neste caso do estudo de argamassas, havendo valores elevados de relação água/material cimentício, devido ao necessário espalhamento destas misturas nas obras, o referido valor não foi atingido. Os resultados obtidos neste trabalho confirmam a necessidade de se estudar e caracterizar adequadamente os materiais utilizados na construção, principalmente os compósitos como as argamassas de alvenaria, pois o uso inadequado de agregados e agentes cimentantes pode afetar muito a capacidade resistente dessas argamassas. Esses resultados aumentam o conhecimento técnico-científico das argamassas de alvenaria, o que permite aos construtores tomar decisões acertadas com base em estudos formais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordinación de la Investigación Científica, CIC, da Universidade Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); bem como financiamento do Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por meio do projeto PRONACE 321260: Desenvolvimento de um modelo de produção social replicável para habitação e habitat e Projeto CF-2023-G-985, Concreto e argamassa biodegradável e compostos poluentes presentes na atmosfera, para sua aplicação em moradias de interesse social, em cidades mexicanas de médio porte; o programa SEP- Prodep; e ainda o apoio técnico do laboratório "Eng. Luis Silva Ruelas" da Faculdade de Engenharia Civil da UMSNH. Finalmente, agradece-se o apoio do engenheiro civil Saúl Mondragón Martínez por sua colaboração nos ensaios de laboratório.

7. REFERÊNCIAS

- Álvarez Galindo, J. I., Martín Pérez, A., García Casado, P. J. (1995). *Historia de los morteros*. Revista PH, 13, 52. <https://doi.org/10.33349/1995.13.263>
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M 17a. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33-C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18

- ASTM International. (2019a). *ASTM C1876-19. Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1876-19>
- ASTM International. (2019b). *ASTM D75/D75M-19. Standard Practice for Sampling Aggregates*. ASTM International.
- ASTM International. (2020a). *ASTM C305-20. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- ASTM International. (2020b). *ASTM E1266-20. Standard Practice for Processing Mixtures of Lime, Fly Ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other Construction Applications*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1266-20>
- ASTM International. (2021). *ASTM C109/C109M-21. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21
- ASTM International. (2022a). *ASTM C31/C31M-22. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-22
- ASTM International. (2022b). *ASTM C128-22. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2022c). *ASTM C150-C150M-22. Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0150-07>
- Beng Wei, C., Othman, R., Yee Ying, C., Putra Jaya, R., Shu Ing, D., Ali Mangi, S. (2021). *Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement*. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.240>
- Brazão Farinha, C., de Brito, J., Veiga, R. (2021). *Incorporation of high contents of textile, acrylic and glass waste fibres in cement-based mortars. Influence on mortars' fresh, mechanical and deformability behaviour*. *Construction and Building Materials*, 303, 124424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124424>
- Danish, A., Ozbakkaloglu, T. (2023). *Impact of nano-silica on the mechanical properties of mortar containing e-waste plastic as fine aggregates*. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.182>
- Durán Ramos, A. M. (2021). *Diseño de mezclas plásticas aglomerantes y su consideración de proporcionamiento por medio del ensayo de fluidez (Bachelor's Degree Thesis)*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gao, X., Yao, X., Xie, R., Li, X., Cheng, J., Yang, T. (2022). *Performance of fly ash-based geopolymer mortars with waste cathode ray tubes glass fine aggregate: A comparative study with cement mortars*. *Construction and Building Materials*, 344, 128243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128243>
- Giordani, C., Masuero, A. B. (2019). *Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state*. *Construction and Building Materials*, 210, 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.077>
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B. (2011). *Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars*. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980–2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>
- Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P. H., Roussel, N. (2016). *Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars*. *Cement and Concrete Research*, 80, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>

- Hammat, S., Menadi, B., Kenai, S., Thomas, C., Kirgiz, M. S., Sousa Galdino, A. G. de. (2021). *The effect of content and fineness of natural pozzolana on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar*. Journal of Building Engineering, 44, 103276. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103276>
- Hu, J. (2005). *A study of effects of aggregate on concrete rheology* [Iowa State University, Digital Repository]. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15380>
- Jacques, K. T. J., Zengyao, W., Shoude, W., Shifeng, H., Xin, C. (2023). *The influence of different fine aggregate and cooling regimes on the engineering properties of sulphoaluminate cement mortar after heating*. Case Studies in Construction Materials, 18, e01866. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01866>
- Li, T., Nogueira, R., de Brito, J., & Liu, J. (2023). *Underlying mechanisms of the influence of fine aggregates' content and properties on mortar's plastic viscosity*. Journal of Building Engineering, 67, 106016. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106016>
- Li, T., Zhou, Y., Zhu, J., Liu, J. (2022). *Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar*. Construction and Building Materials, 332, 127362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127362>
- Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Perez-Lopez, T., Alonso-Guzman, E. M., Arreola-Sanchez, M., Navarrete-Seras, M. A., Borrego-Perez, J. A., Sanchez-Calvillo, A., Guzman-Torres, J. A., Perez-Quiroz, J. T. (2021). *Effect of the Addition of Agribusiness and Industrial Wastes as a Partial Substitution of Portland Cement for the Carbonation of Mortars*. Materials, 14(23), 7276. <https://doi.org/10.3390/ma14237276>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Ruvalcaba-Sil, J. L., Sánchez-Calvillo, A., Martínez-Molina, W., García, H. L. C., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Borrego-Pérez, J. A. (2020). *Compressive strength and ultrasonic pulse velocity of mortars and pastes, elaborated with slaked lime and high purity hydrated lime, for restoration works in Mexico*. In Key Engineering Materials: Vol. 862 KEM. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.51>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Sanchez-Calvillo, A., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Navarro-Ezquerria, A., Gonzalez-Sanchez, B., Martinez-Molina, W. (2023). *Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration*. Heritage, 6(3), 2582–2600. <https://doi.org/10.3390/heritage6030136>
- ONNCCE. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica. Método de prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2006). *NMX-C-084-ONNCCE-2006. Industria de la construcción - Agregados para Concreto - Partículas más Finas que la Criba 0,075 mm (No. 200) por Medio de Lavado – Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-486-ONNCCE-2014. Industria de la construcción-Mampostería - Mortero para uso estructural- especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación.
- ONNCCE. (2015a). *NMX-C-061-ONNCCE-2015. Building Industry – Hydraulic Cements – Determination of Compressive Strength of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2015b). *NMX-C-144-ONNCCE-2015. Building Industry - Hydraulic Cement - Specifications for the Apparatus used in the Flow Test for Mortars made of Hydraulic Cements*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019. Building Industry – Electrical Resistivity of Hydraulic Concrete - Specifications and Testing Methods*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

- ONNCCE. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020. Industria de la construcción - Agregados para concreto - Determinación de la reactividad potencial*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2002). *N-CMT-2-01-004/02. Characteristics of Materials. Materials For Structures. Materials For Hydraulic Concrete*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ren, Q., Tao, Y., Jiao, D., Jiang, Z., Ye, G., De Schutter, G. (2021). *Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size*. Cement and Concrete Composites, 122, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104163>
- Ribeiro, D. V., Oliveira Rey, R. (2019). *Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Alcalis-Agregado (RAA)*. Revista ALCONPAT, 9(2), 185–199. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>
- Sánchez Tizapa, S., Villaseñor Franco, A., Guinto Herrera, E., Barragán Trinidad, R., Mebarki, A. (2017). *Propuesta de valores de referencia para la resistencia de diseño a compresión diagonal y compresión de la mampostería en el estado de Guerrero, México*. Revista ALCONPAT, 7(3), 231–246. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>
- Senff, L., Barbeta, P. A., Repette, W. L., Hotza, D., Paiva, H., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2009). *Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments*. Construction and Building Materials, 23(10), 3107–3111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.028>
- Souza, A. T., Barbosa, T. F., Riccio, L. A., Santos, W. J. dos. (2020). *Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar*. Journal of Materials Research and Technology, 9(1), 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.024>
- Stolz, C. M., Masuero, A. B. (2018). *Influence of grain distribution on the rheological behavior of mortars*. Construction and Building Materials, 177, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131>
- Tena, A., Liga, A., Pérez, A., González, F. (2017). *Proposal for improved mixes to produce concrete masonry units with commonly used aggregates available in the Valley of Mexico*. Revista ALCONPAT, 7(1), 36–56. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.170>
- Ullah, Z., Qureshi, M. I., Ahmad, A., Khan, S. U., Javaid, M. F. (2021). *An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete*. Journal of Building Engineering, 38, 102177. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102177>
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E. (2008). *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*. Cement and Concrete Composites, 30(4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>
- Wu, M., Zhao, Q., Shen, W., Zhao, J., Xu, G., Zhao, D., Xiong, X. (2021). *Mix design of self-leveling mortar prepared by crushed sand with high flowability and early strengthening*. Construction and Building Materials, 283, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122679>

Estudo de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato

F. E. Z. Alves¹ , R. P. Gurkewicz^{1,2,3*} , E. C. Zancan^{1,2} ,

L. J. J. Nieves^{1,2} , E. G. P. Antunes^{1,2} 

* Autor de Contato: rafaelpgurkewicz@unesc.net

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.643>

Recebido: 28/10/2022 | Correções recebidas: 09/04/2023 | Aceito: 11/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

Esta pesquisa estuda a capacidade de absorção de água em painéis de concreto e seu processo de autocicatrização, através da incorporação de aditivo ao concreto ou aplicação na superfície. Através de ensaios de permeabilidade, absorção de água por imersão e por capilaridade, após a cura úmida dos painéis, os painéis com aditivo cristalizante aplicado superficialmente apresentaram menor capacidade de absorção, seguido pelos sem aditivo e as com o aditivo incorporado ao concreto. Através da microscopia realizada nos painéis partidos ao meio, pôde-se observar que a cristalização dos painéis com aditivo superficial estavam mais avançadas em comparação aos com o aditivo incorporado. As fissuras induzidas não atingiram o total preenchimento de poros após a cura, em ambos os tipos de aplicação.

Palavras-chave: aditivo cristalizante; fissura; auto cicatrização; impermeabilização; concreto.

Citar como: Alves, F. E. Z., Gurkewicz, R. P., Zancan, E. C., Nieves, L. J. J., Antunes, E. G. P. (2023), "*Estudo de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato*", Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 175 – 191, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.643>

¹ Departamento de Engenharia Civil, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

² GPDECC, Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, UNESC, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor F. E. Z. Alves contribuiu com a atividade de conceitualização em 80%, experimentação em 75%, análise de dados em 75% e redação em 70%, o autor R. D. P. Gurkewicz contribuiu com a atividade de conceitualização em 20%, redação em 30%, revisão em 33% e tradução em 50%, o autor E. C. Zancan contribuiu com a atividade de experimentação em 25%, análise de dados em 25%, e supervisão em 50%, o autor L. J. J. Nieves contribuiu com a atividade de revisão em 33% e tradução em 50%, o autor E. G. P. Antunes contribuiu com a atividade de revisão em 34% e supervisão em 50%.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Study of waterproofed concrete panels with silicate-based permeability reducing admixtures

ABSTRACT

This research studies the water absorption capacity of concrete panels and its self-healing process, using the incorporation of admixtures to the concrete or its application on the surface. Through permeability tests, water absorption by immersion and by capillarity, after the wet curing, the panels with crystalline admixtures applied superficially showed lower absorption capacity, followed by those without admixtures and those with the admixtures incorporated into the concrete, which showed greater absorption. Through the microscopy performed on the panels split in half, it was observed that the crystallization of the panels with superficial admixtures was more advanced compared to those with the incorporated admixtures. The induced fissures did not reach full pore filling after curing in both types of application.

Keywords: crystalline admixtures; fissure; self-healing; waterproofing; concrete.

Estudio de paneles de hormigón impermeabilizado con aditivo reductor de permeabilidad a base de silicatos

RESUMEN

Esta investigación estudia la capacidad de absorción de agua de los paneles de hormigón y su proceso de autorreparación, mediante la incorporación de aditivo al hormigón o aplicación sobre la superficie. Mediante ensayos de permeabilidad, absorción de agua por inmersión y capilaridad, después del curado en húmedo, los paneles con aditivo cristalizador aplicado superficialmente mostraron menor capacidad de absorción, seguidos de los sin aditivo y los con aditivo incorporado, que mostraron mayor absorción. A través de la microscopía, se pudo observar que la cristalización de los paneles con aditivo superficial fue más avanzada en comparación con aquellos con aditivo incorporado. Las fisuras inducidas no alcanzaron el llenado completo de los poros después del curado, en ambos tipos de aplicación.

Palabras clave: aditivo cristalizante; fisura; autorreparación; impermeabilización; 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

Nos últimos anos, com a diminuição da demanda e o aumento da competitividade no mercado da construção civil, as empresas passaram a dar mais atenção para os materiais utilizados em suas edificações, a fim de minimizar custos, retrabalhos e desta forma mantendo-se competitivas no mercado. Além de fatores econômicos, a norma de desempenho, como é conhecida a NBR 15575:2013, com ênfase em atender os requisitos dos usuários, oportuniza a busca e o uso de novos materiais e métodos construtivos em edificações.

Dentre os muitos materiais empregados em uma edificação, os utilizados para a impermeabilização merecem uma atenção especial, tendo em vista que seu custo é de 1% a 3% do valor da edificação (VEDACIT, 2019).

Atualmente, os produtos utilizados no processo de impermeabilização são divididos em 2 grupos pela NBR 9574:2008, materiais rígidos e flexíveis. Deste modo, devem ser aplicados em locais condizentes com suas características técnicas para garantir a eficiência do sistema. Dentro do grupo dos rígidos, estão os aditivos cristalizantes. Compostos por silicatos, que quando misturados com água e em contato com a alcalinidade do concreto, tornam-se hidrossilicatos, um cristal insolúvel. Os cristais têm capacidade de colmatar poros e fissuras no concreto, tornando-o impermeável.

A capacidade de colmatação de fissuras, também chamado de self-healing, é um grande diferencial do sistema, principalmente em estruturas que necessitam ser impermeáveis a pressões negativas, conforme processo descrito pela norma NBR 9574:2008. Através da capacidade de autocura do concreto, essas fissuras, se não ultrapassando limite de 0,6 mm de abertura, podem se colmatar automaticamente.

Segundo Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007), o tratamento de cristalização é um processo físico-químico onde os ingredientes ativos do cristalizante desencadeiam reações catalíticas, compatíveis com as reações de hidratação do cimento, em que ocorre a formação de cristais não solúveis e não tóxicos na estrutura do concreto. Desta forma, garantindo que não haja penetração de água por capilaridade, suportando pressões hidrostáticas tanto positivas quanto negativas de até 0,7 MPa.

Por ser adicionado no concreto fresco, após o endurecimento, os cristalizantes evitam a passagem da água em fase líquida, porém não impedem totalmente a passagem quando na fase gasosa. Este comportamento pode ser validado pelos autores Pazderka e Hájková (2016), que após ensaios com dois cristalizantes distintos obtiveram percentuais de apenas 16% e 20% de redução na absorção de vapor d'água.

Recentemente estudos realizados por Huang et al. (2016) com auxílio de ressonância magnética apontaram que em concretos com aditivos redutores de permeabilidade, após algumas horas, o teor de água não ligado quimicamente diminuiu nas áreas adjacentes às fissuras, comprovando que a água que havia penetrado na fissura foi utilizada em processos de hidratação, tornando essas áreas mais densas.

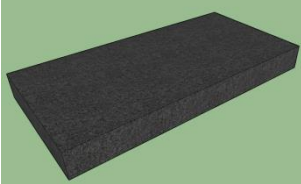
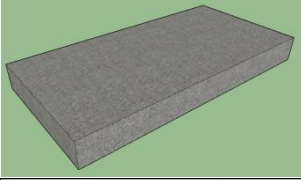
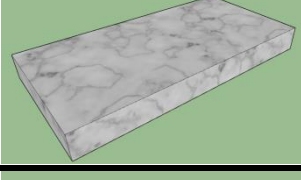
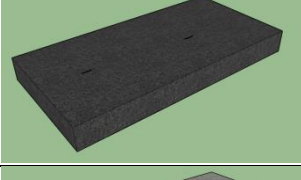
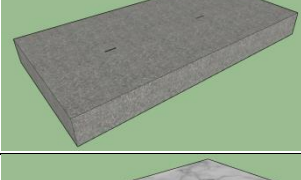
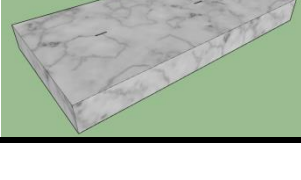
Segundo a empresa fabricante do produto utilizado no presente trabalho, concretos aditivados chegam a colmatar fissuras de até 0,6 mm, esse valor sendo 0,2 mm superior que o máximo permitido pela norma NBR 6118:2014, para concretos armados inseridos na classe de agressividade ambiental I.

Esta pesquisa estuda e avalia a capacidade de absorção de água em painéis de concreto e seu processo de auto cicatrização (self-healing), através de dois métodos de aplicação de aditivos redutores de permeabilidade.

2. PROCEDIMENTO

A fim de verificar a impermeabilidade e o efeito self-healing em painéis de concreto, elaborou-se um procedimento experimental que consiste na execução de 2 grupos de painéis com 3 subgrupos cada. A distinção entre o primeiro e o segundo grupo refere-se a presença de fissuras induzidas, ou seja, um grupo apresentava duas fissuras induzidas em toda a espessura do painel, enquanto o segundo grupo não as apresentava. Já os subgrupos distinguem-se de acordo com o tratamento de impermeabilização empregado, sendo que o primeiro subgrupo não possuía qualquer tipo de tratamento de impermeabilização, enquanto o segundo e o terceiro subgrupos foram impermeabilizados, porém de forma distinta entre eles. O segundo subgrupo foi impermeabilizado através da incorporação do aditivo cristalizante ao concreto e no terceiro subgrupo o aditivo cristalizante foi aplicado sobre uma das faces dos painéis. Para tal, foram produzidos 18 painéis (9 para cada grupo, sendo 3 para cada subgrupo). A Tabela 1 apresenta os grupos e os subgrupos desenvolvidos, além da nomenclatura adotada para cada subgrupo de painéis.

Tabela 1. Modelos de painéis.

GRUPO	SUBGRUPO		NOMENCLATURA
SEM FISSURA		Painel Controle Sem Aditivo Cristalizante	S CRI
		Painel Com Aditivo Cristalizante Misturado Ao Concreto Ainda Fresco	C CRI
		Painel Com Aditivo Cristalizante Aplicado Superficialmente Após Tempo De Cura	C CRI SOB
COM FISSURA		Painel Controle Sem Aditivo Cristalizante	S CRI+F
		Painel Com Aditivo Cristalizante Misturado Ao Concreto Ainda Fresco	C CRI+F
		Painel Com Aditivo Cristalizante Aplicado Superficialmente Após Tempo De Cura	C CRI SOB+F

Os painéis produzidos têm dimensão de 50 x 25 x 5 cm (comprimento x largura x espessura) e para sua execução foram empregadas fôrmas de madeira com espessura de 2 cm. O concreto utilizado foi dosado em central usinado com resistência média de 10 MPa, com abatimento de 10 ± 2 cm, conforme NBR 16889:2020. O preenchimento das fôrmas foi realizado manualmente.

A aplicação do aditivo cristalizante sobre os painéis dos subgrupos “C CRI SOB” e “C CRI SOB+F” ocorreu após 28 dias de cura dos painéis. A Figura 1(a) ilustra a execução do lançamento do concreto nos moldes e a Figura 1(b) o molde preenchido com o concreto.

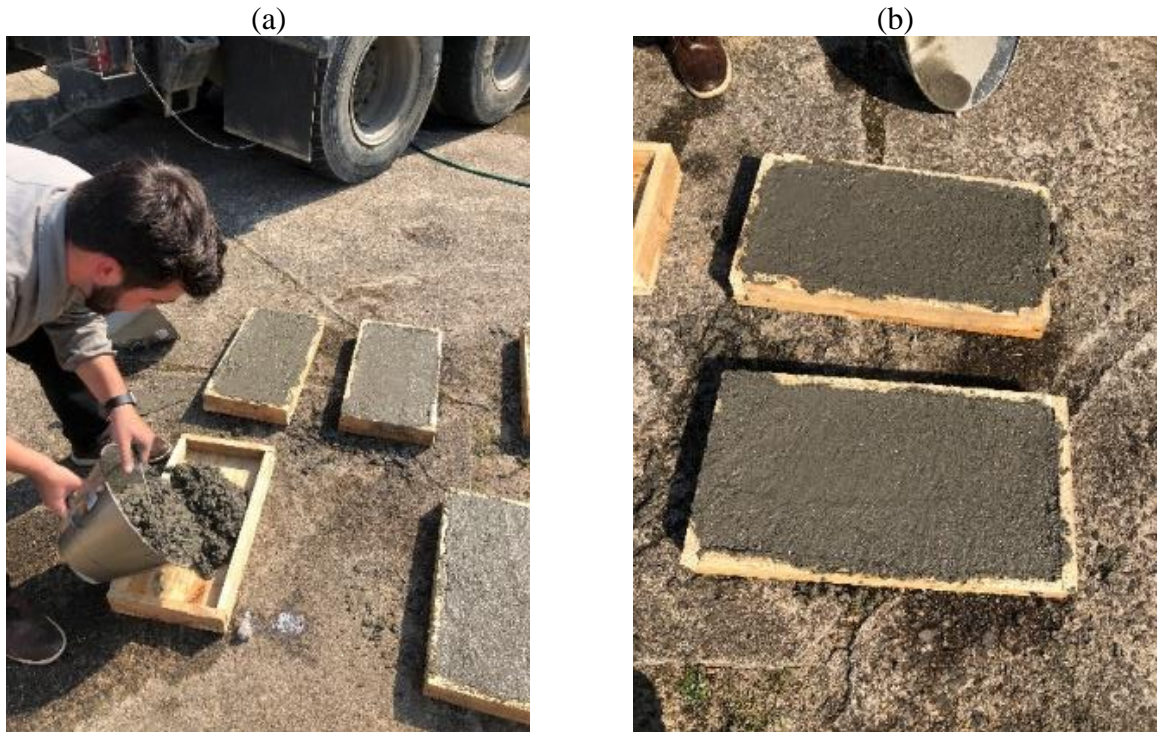


Figura 1. Formas: (a) concretagem de um painel, (b) molde preenchido com o concreto

As fissuras foram induzidas nos painéis através da inserção de duas lâminas de alumínio com 0,4 mm de espessura que foi introduzida em cada painel logo após a sua concretagem e retirada após 48 horas da concretagem, quando sua fluidez não fosse capaz de ocasionar o fechamento da fissura. A espessura da lâmina foi determinada seguindo a NBR 6118:2014, que limita o valor de 0,4 mm como maior dimensão admissível de fissuração em elementos estruturais de concreto armado e pela recomendação do fabricante sobre a dimensão máxima de colmatação do produto.

A Figura 2(a) apresenta as lâminas de alumínio inseridas em um painel e a Figura 2(b) a fissura induzida através da lâmina de alumínio, ambas com 48 horas após a concretagem, isto é, quando já era possível a retirada das lâminas dos painéis de concreto.

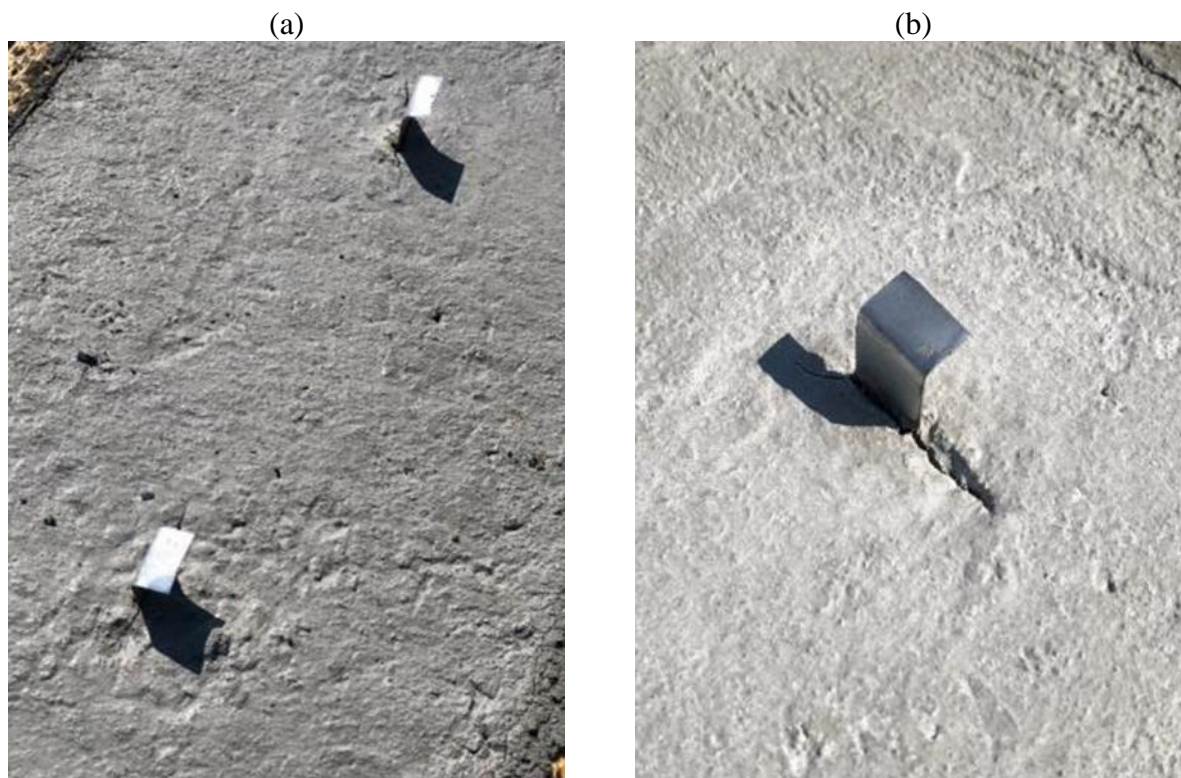


Figura 2. Lâminas para indução de fissura: (a) painel com duas lâminas, (b) lâmina em detalhe.

A Tabela 2 apresenta as características do aditivo cristalizante empregado na pesquisa.

Tabela 2. Características do aditivo

Densidade	1.200 Kg/m ³
Base	Silicatos
Dosagem	200 ml para cada 50kg de cimento ou 1,2 l para cada m ³ de concreto
Aparência	Líquido amarelado
pH	11
Viscosidade (Ford 4 a 25°C)	12 segundos
Validade	24 meses a partir da data de fabricação

Para a mistura do aditivo ao concreto, utilizou-se uma betoneira. Cabe ressaltar, que tal ação se fez necessária a fim de não contaminar o concreto dos painéis sem o uso do aditivo. A Figura 3(a) apresenta a quantidade do produto utilizada para a concretagem e a Figura 3(b) o processo de incorporação do aditivo ao concreto.

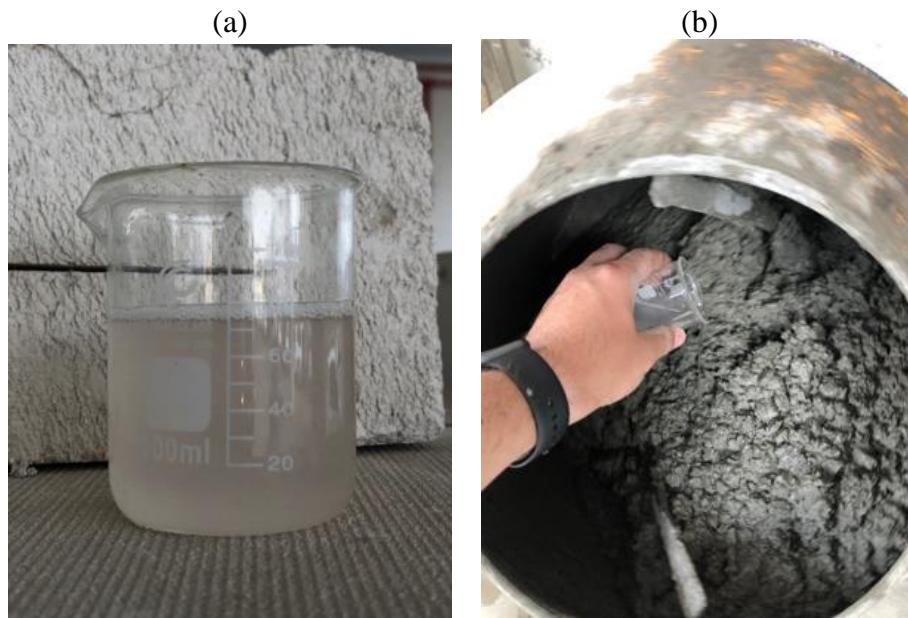


Figura 3. Processo de mistura do cristalizante: (a) quantidade necessária de cristalizante, (b) processo de mistura na betoneira

Após a execução e desforma dos painéis, que ocorreu ao terceiro dia, os painéis foram submetidos a cura submersa por um período de 28 dias. Para não ocorrer a contaminação das amostras ainda não impermeabilizadas, os painéis com impermeabilização incorporada ao concreto foram separados em diferentes tanques. Após os 28 dias de cura os painéis foram secos em estufa por 72 horas com temperatura de 40 ± 5 °C. A Figura 4(a) apresenta os painéis durante a cura submersa e a Figura 4(b) os painéis após o processo de cura e secagem.

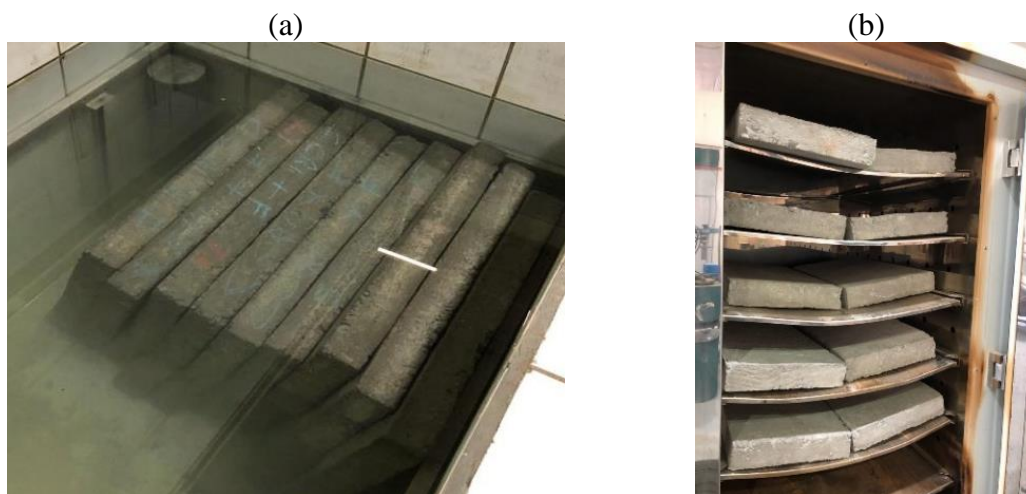


Figura 4. Painéis durante cura submersa e secagem: (a) painéis no tanque, (b) painéis na estufa.

Finalizada a secagem dos painéis, realizou-se a aplicação do aditivo cristalizante sobre os painéis dos subgrupos “C CRI SOB” e “C CRI SOB+F”. A aplicação foi realizada através de 2 demãos do produto com o auxílio de uma trincha. A superfície desses painéis ficou completamente saturada com o aditivo cristalizante e levou aproximadamente 3 horas para que o aditivo fosse totalmente absorvido pelos painéis. Posteriormente, esses painéis foram armazenados ao ar livre durante 3 dias, sendo que, durante esses dias ficaram expostos à chuva, que auxilia na hidratação do aditivo cristalizante. A Figura 5(a) apresenta a aplicação superficial do aditivo em uma das faces das

placas, a Figura 5(b) as placas durante o processo de absorção do produto e a Figura 5(c) o processo de cura dos painéis com aplicação superficial.

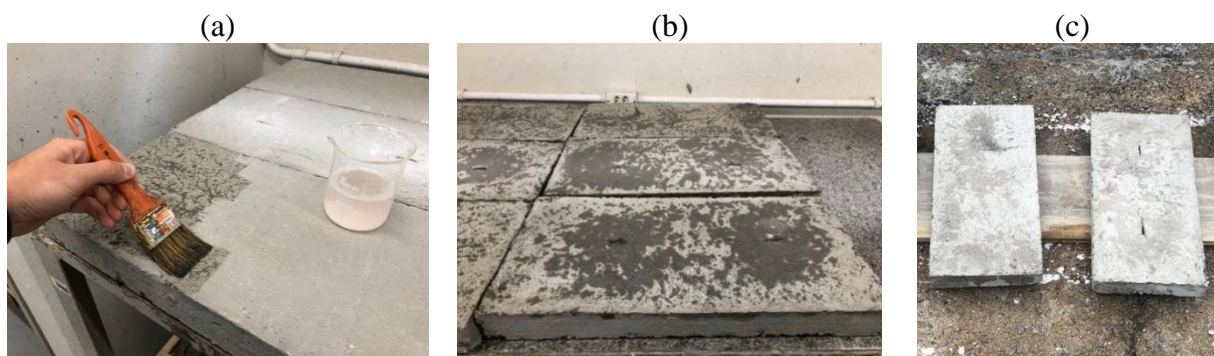


Figura 5. Processo de aplicação do cristalizante: (a) aplicação com pincel, (b) painéis impermeabilizados, (c) painéis durante processo de cura.

Os painéis “C CRI SOB” e “C CRI SOB+F” receberam um total de 14,4 mm de chuva, conforme ilustra a Figura 6, extraído da estação meteorológica próximo ao local do ensaio.

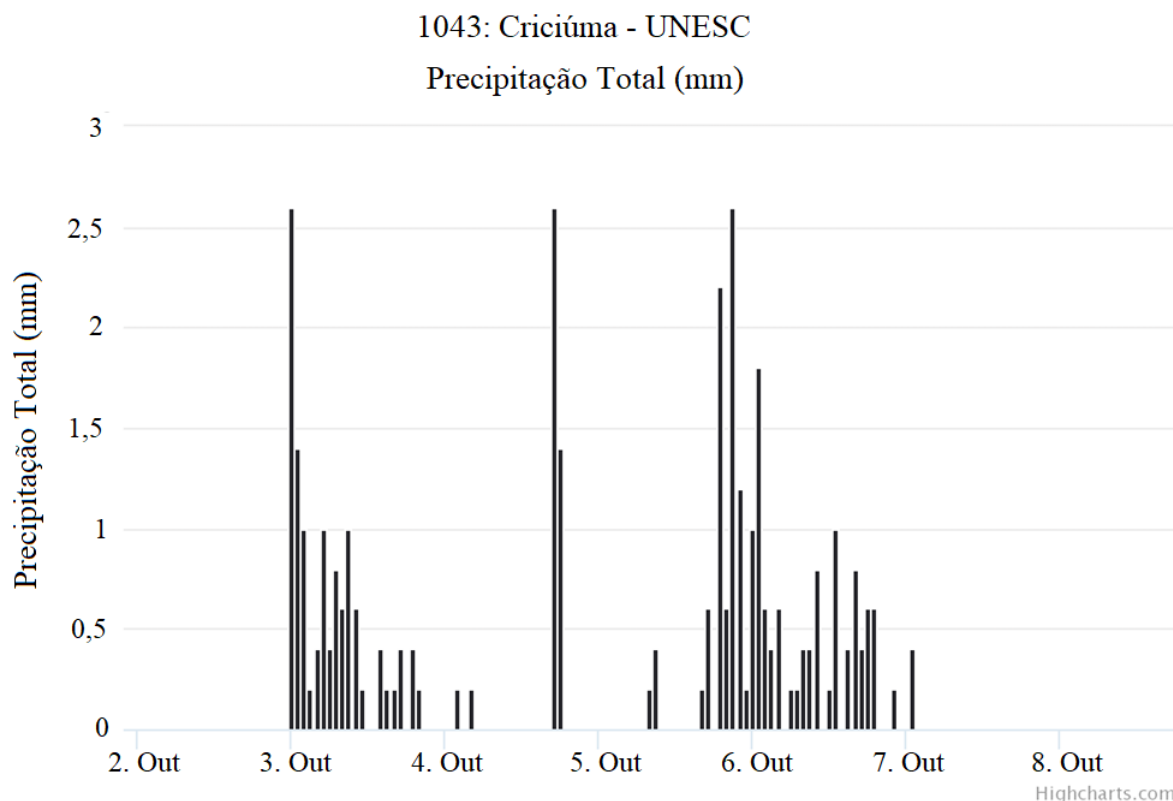


Figura 6. Gráfico índice pluviométrico (Fonte: EPAGRI).

Finalizada a etapa de execução, impermeabilização e cura dos painéis, iniciaram-se os ensaios para verificação de permeabilidade dos painéis. Os ensaios realizados foram: determinação de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade com cálculo do índice de vazios e absorção de água pelo Tubo de Karsten.

O primeiro ensaio realizado foi o teste para a determinação da permeabilidade pelo Tubo de Karsten. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 14992:2003, que especifica tal verificação para argamassas à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas. Os tubos de

Karsten foram dispostos sobre os painéis de concreto, sendo que suas bases laterais, que ficavam em contato com a face dos painéis, foram vedadas com poliuretano. Cada tubo foi fixado a 10 cm de distância das bordas e 30 cm de espaçamento entre os tubos, sendo, então, dois tubos por painel. Os tubos de Karsten foram preenchidos com água até o volume pré-definido de 3,5 ml e posteriormente realizou-se as medições do nível após 60, 120, 180 e 240 minutos. Cada painel contou com dois pontos de medição de permeabilidade.

A Figura 7(a) apresenta o ensaio sendo realizado no painel com cristalizante e a Figura 7(b) o tubo de Karsten sobre a fissura de uma placa com cristalizante aplicado sobre o concreto.

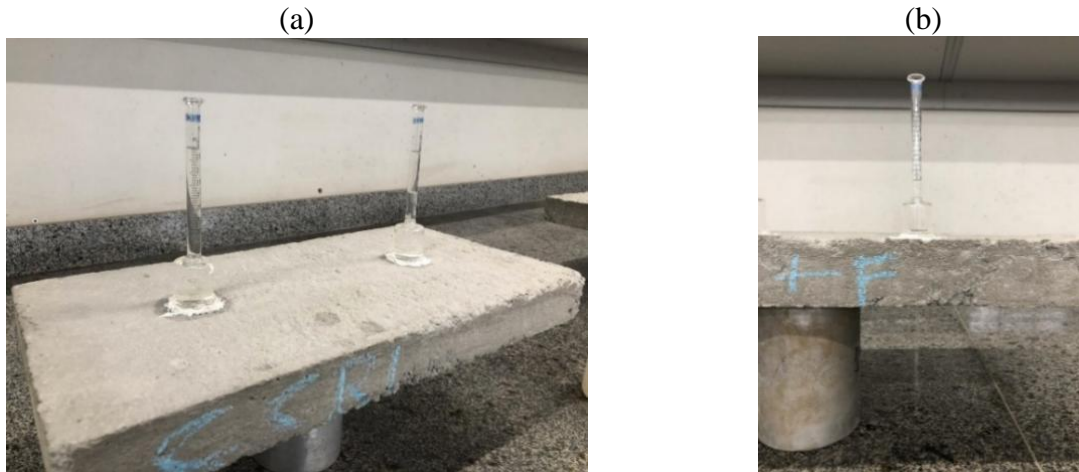


Figura 7. Tubos de Karsten fixados nos painéis: (a) Tubo em painel sem fissura, (b) Tubo em painel com fissura.

O segundo ensaio realizado refere-se à determinação da absorção de água do painel e o cálculo do índice de vazios, conforme descrito pela NBR 9778:2005, utilizando-se três painéis por condição. Os painéis foram inicialmente secos em estufa à 105 ± 5 °C por 72 horas e aferida a massa seca, posteriormente imersos em água por mais 72 horas, para sua completa saturação. Após a retirada dos painéis saturados foi realizada a pesagem com a amostra saturada e outra pesagem com auxílio da balança hidrostática, como representado na Figura 8. A partir destes valores, foi possível determinar a absorção de água, o índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada.



Figura 8. Pesagem hidrostática.

O percentual de absorção pode ser calculado com a Equação 1.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde

A é o teor de absorção, expresso em percentual;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa.

O último ensaio realizado foi o de determinação da absorção de água por capilaridade, descrito pela norma NBR 9779:1995. Para a realização deste ensaio os painéis foram dispostos em uma lâmina de água de 0,5 cm por um período de 72 horas, a fim de verificar a absorção de água por capilaridade. Para ser possível observar variações de absorção entre os painéis, as faces superiores impermeabilizadas ficaram submersas. Foram realizadas medições da massa após 3, 6, 24, 48 e 72 horas.

A Figura 9(a) apresenta a verificação da lâmina d'água de 0,5 cm, a Figura 9(b) os painéis dispostos no tanque durante o processo de absorção e a Figura 9(c) a pesagem de um dos painéis.

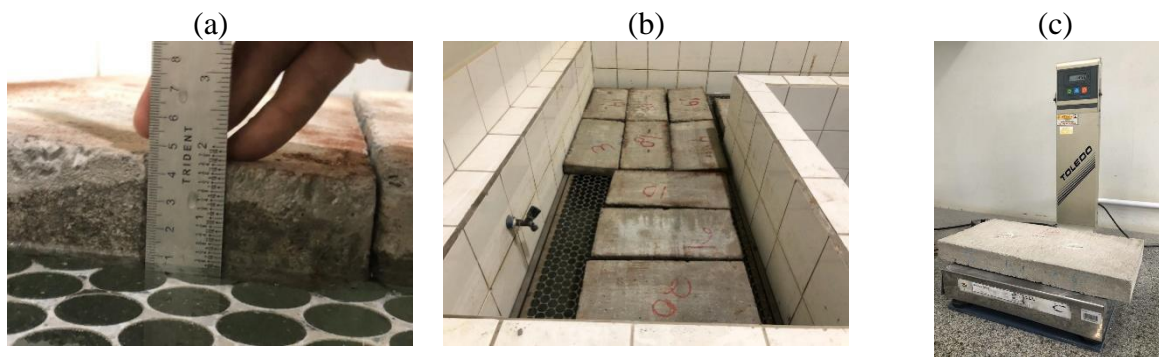


Figura 9. Ensaio de absorção por capilaridade: (a) Painel submerso com 0,5 cm de profundidade, (b) Painéis no tanque, (c) Painel sendo aferida da massa.

A absorção de água por capilaridade pode ser calculada com a Equação 2.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (2)$$

Onde

C é a de absorção de água por capilaridade, expresso em gramas por centímetro quadrado;

m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período especificado, expressa em gramas;

m_s é a massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2 °C, expressa em gramas.

S é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados.

Os dados dos resultados foram analisados por meio da análise de variância (ANOVA) e pelo Teste de Tukey, quando necessário, com significância de 95%.

Após finalizar os ensaios, foi realizado uma microscopia das placas para melhor observação do estado de cristalização dos poros. Para isso foram partidas 3 placas, sendo elas “S CRI”, “COM CRI” e “C CRI SOB”, e um microscópio digital com capacidade de 1600x de ampliação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de permeabilidade com Tubo de Karsten, representado pela Figura 10, aponta os valores de permeabilidade obtidos ao longo do tempo (60, 120, 180 e 240 min). Conforme pode ser visualizado, os painéis com maior permeabilidade aos 240 minutos, tempo final de medição, foram os painéis com aditivo cristalizante incorporado ao concreto, seguido pelos painéis sem cristalizante e, por último, pelo painel com cristalizante aplicado sobre sua superfície.

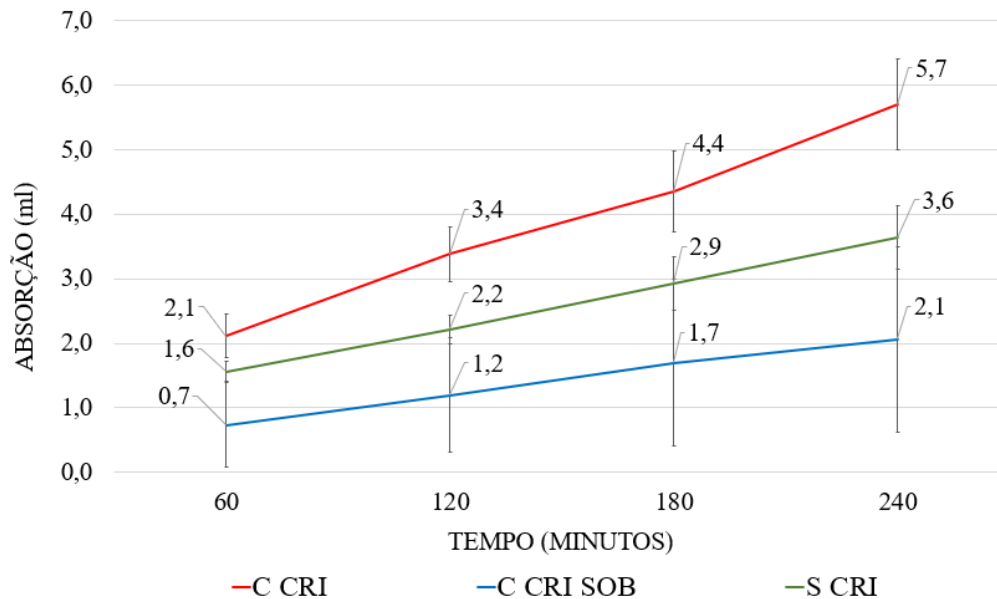


Figura 10. Absorção média ao longo do tempo.

Através da análise dos valores de permeabilidade apresentados graficamente, foi possível observar que tanto a absorção inicial quanto a velocidade de absorção dos painéis com incorporação do aditivo cristalizante foram superiores aos dos outros painéis. A permeabilidade mais alta, desde a primeira medição, dos painéis “C CRI” em relação aos outros painéis chegou a 171,43% mais absorção em comparação ao “C CRI SOB” e 58,33% a mais em relação ao painel “S CRI”.

A velocidade de absorção de água mais alta dos painéis “C CRI” pode ser visualizada pela inclinação mais acentuada deste em relação a dos outros painéis, assim como, pela maior diferença entre a absorção inicial e final que foi de 171,34%, sendo que, para os painéis “C CRI SOB” foi de 200% e dos painéis “S CRI” foi de 125%.

Após análise estatística, através de análise de variância (ANOVA) pôde-se concluir que os painéis apresentam diferença significativa entre eles no ensaio de permeabilidade através do tubo de Karsten, ou seja, o tipo de tratamento de impermeabilização influenciou nos resultados desta verificação. Através do Teste de Tukey ($p=4,13477E-05$) pode-se afirmar que os painéis “C CRI” foram os mais permeáveis, seguidos pelos painéis “S CRI” e, por último pelo painel “C CRI SOB”. É importante mencionar que não foi possível analisar a permeabilidade, pelo método do tubo de Karsten, dos painéis “C CRI + F”, “S CRI + F” e “C CRI SOB + F”, com fissuras induzidas, devido à dimensão final da abertura da fissura, com aproximadamente 1,3 mm. Ainda assim, cabe salientar que se buscou realizar o ensaio, no entanto, dado a espessura da abertura, a água do tubo de Karsten, que foi inserido exatamente sobre a fissura, esvaía-se por completo através da fenda em segundos. A Figura 11(a) apresenta a lâmina após 48 horas da concretagem dos painéis e a Figura 11(b) a fissura após o processo de cura dos painéis.



Figura 11. Fissuras: (a) Fissura ainda com a lâmina, (b) Fissura após a retirada da lâmina

A fissura induzida, que fora planejada para 0,4 mm, excedeu sua abertura em 0,9 mm, já que findou em 1,3 mm (Figura 11), extrapolando o 0,6 mm apresentado pela empresa como dimensão máxima para colmatação de fissuras.

Sabe-se que durante o processo de endurecimento do concreto ocorrem reações que originam sua retração plástica. Segundo Marin, Brasil (2016) a retração plástica ocorre pela evaporação da água na superfície do concreto recém adensado e é influenciada pelas condições climáticas, as quais o concreto estará exposto. Portanto, não foi possível avaliar a colmatação das fissuras induzidas através do ensaio de permeabilidade pelo método do tubo de Karsten, tendo em vista que as fissuras induzidas ficaram com espessura de abertura final de aproximadamente 1,3 mm. Além disso, o processo de colmatação pelo efeito “self-healing” é lento, pois conforme apresentado por Venquiaruto (2017) após 91 dias de cura úmida, houve uma recuperação parcial das microfissuras, com relação as análises após 3 e 28 dias. Após 3 dias de cura as fissuras oscilaram entre 2.294 μm a 5.410 μm , e aos 91 dias apresentavam dimensões de 1.204 μm a 3.077 μm .

Através dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão, apresentados a partir das Figuras 12 e 13, pôde-se concluir que novamente os painéis com cristalizante incorporado ao concreto fresco apresentaram um maior índice de vazios e, conseqüentemente uma maior absorção após 72 horas submersas. Os painéis com cristalizante aplicado superficialmente apresentaram o menor valor de índice de vazios e uma média 1,29% menor que os painéis com cristalizante misturado ao concreto.

Os resultados foram condensados em “C CRI E C CRI+F” (com cristalizante e com cristalizante + fissura induzida), “C CRI SOB E C CRI SOB+F” (com cristalizante superficialmente e com cristalizante superficialmente + fissura induzida), “S CRI E S CRI + F” (sem cristalizante e sem cristalizante + fissura induzida).

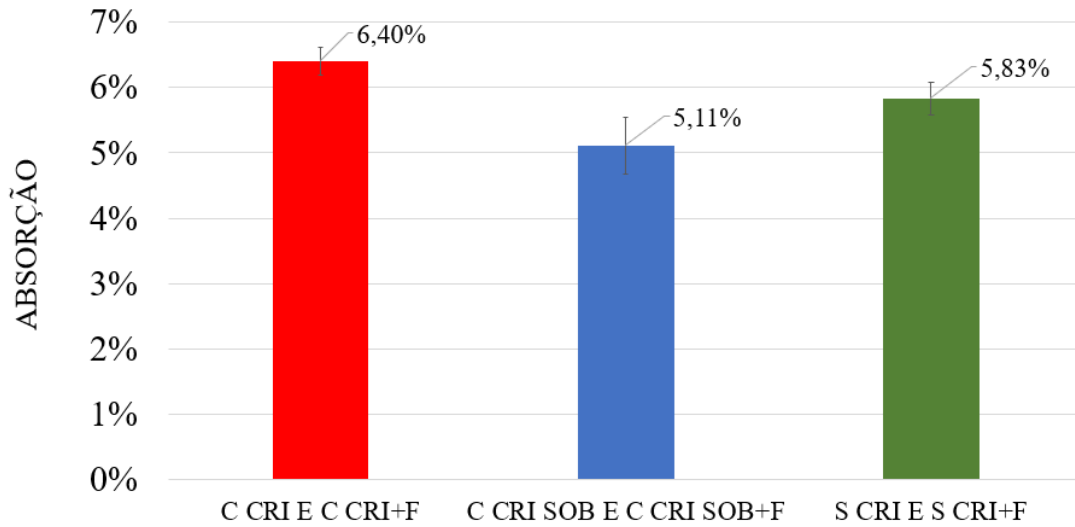


Figura 12. Absorção após 72 horas.

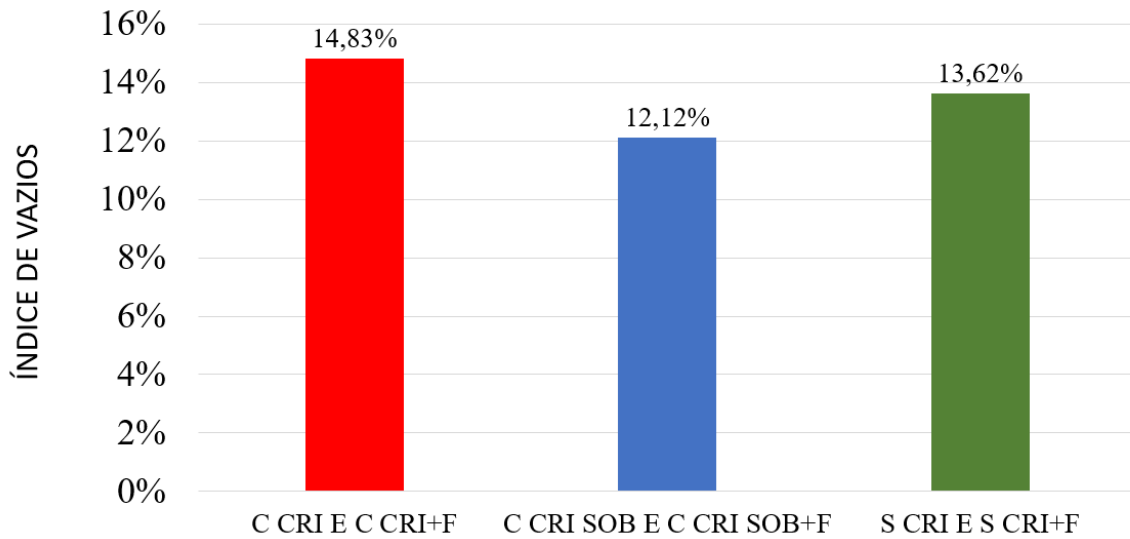


Figura 13. Índice de vazios.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade podem ser visualizados na Figura 14. Novamente, constatou-se que os painéis “C CRI” e “C CRI + F” apresentaram valores que demonstraram maior permeabilidade desses painéis em relação aos outros.

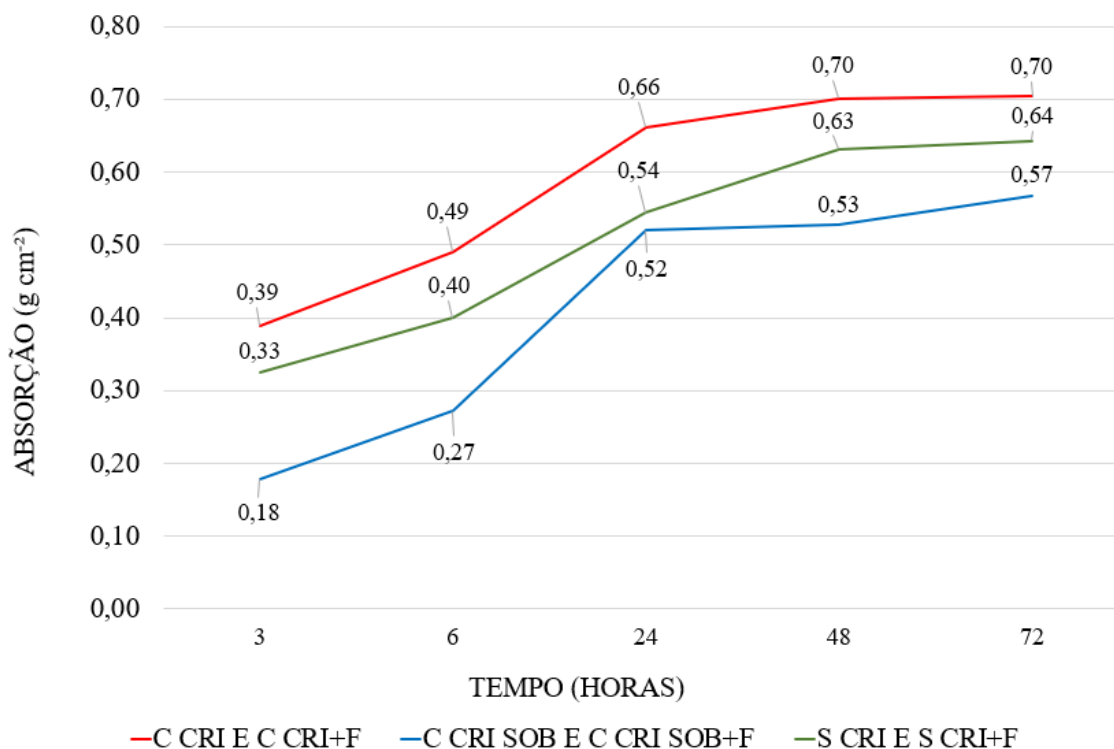


Figura 14. Absorção por capilaridade.

Neste ensaio os painéis “C CRI” e “C CRI+F” tiveram uma absorção de 9,38% superior aos painéis referência, já os painéis “C CRI SOB” e “C CRI SOB+F” apresentaram uma diminuição de 10,94%. Também é possível observar que durante os períodos de 3 e 24 horas houve a maior absorção pelos painéis, após esses períodos as placas tiveram baixas absorções.

Após análise estatística por meio da análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey, com significância de 95% ($p=0,000142449$), pôde-se concluir que os painéis apresentam significativa diferença em seus resultados de absorção por capilaridade em 72 horas.

Com base nos resultados obtidos nos três ensaios (tubo de Karsten, absorção por imersão e absorção por capilaridade) pôde-se concluir que a incorporação do aditivo redutor de permeabilidade causou significativo aumento de permeabilidade e absorção de água em relação aos outros tipos de tratamentos. Enquanto, os painéis do tipo “C CRI SOB” e “C CRI SOB + F” tiveram uma significativa diminuição em sua permeabilidade em relação aos painéis sem tratamento (“S CRI” e “S CRI + F”). Este comportamento pode ser justificado pelo processo de cristalização do aditivo redutor de permeabilidade. Para a reação do aditivo de silicato ocorrer, é necessário hidratá-lo, similarmente às reações de hidratação dos grãos de cimento. Portanto, a água disponibilizada inicialmente na mistura acaba sendo necessária a ambos os ativos nos primeiros dias, ocasionando maior lentidão na formação dos cristais do concreto e dos cristais que colmatam os poros.

A presença do aditivo misturado ao concreto durante o processo de cura pode causar reações internas que dividem o poder de cristalização, já que ambas utilizam a água para o processo. Desta forma a cristalização do produto juntamente com a do hidróxido de cálcio podem ser responsáveis pela maior absorção inicial. A formação lenta dos cristais, quando o aditivo é incorporado ao concreto, se dá pela gradativa formação dos cristais no cimento, criados durante o processo de cura, já que o produto reage tanto com o cimento quanto com a água para sua cristalização. Desta maneira, os cristais do aditivo e do concreto passam a ter uma hidratação mais lenta que comparado com os painéis sem o cristalizante.

Esse comportamento também foi observado por Araújo, Saviatto (2018), que após ensaio de absorção e compressão, observaram um aumento de permeabilidade e um decréscimo de resistência nas placas com o aditivo misturado ao concreto, após 28 dias de cura submersa.

A aplicação superficial nos painéis após o processo de cura apresenta um melhor desempenho inicial devido a maior concentração superficial do produto e dos cristais de hidróxido de cálcio do concreto já estarem em maioria hidratados no momento da aplicação do aditivo redutor de permeabilidade.

Para uma melhor visualização dos processos cristalinos nos 3 tipos de painéis, foram feitas microscopias com microscópio digital que possui capacidade de ampliação de 1600x. As referidas imagens estão representadas na Figura 15(a) que ilustra o painel após o processo de corte, Figura 15(b) microscopia do painel “C CRI”, Figura 15(c) painel “C CRI SOB” e a Figura 15(d) painel “S CRI”. O corte no painel foi realizado com serra diamantada e refrigeração à água no local do corte e minimizando-se as vibrações, conforme NBR 7680: 2015.

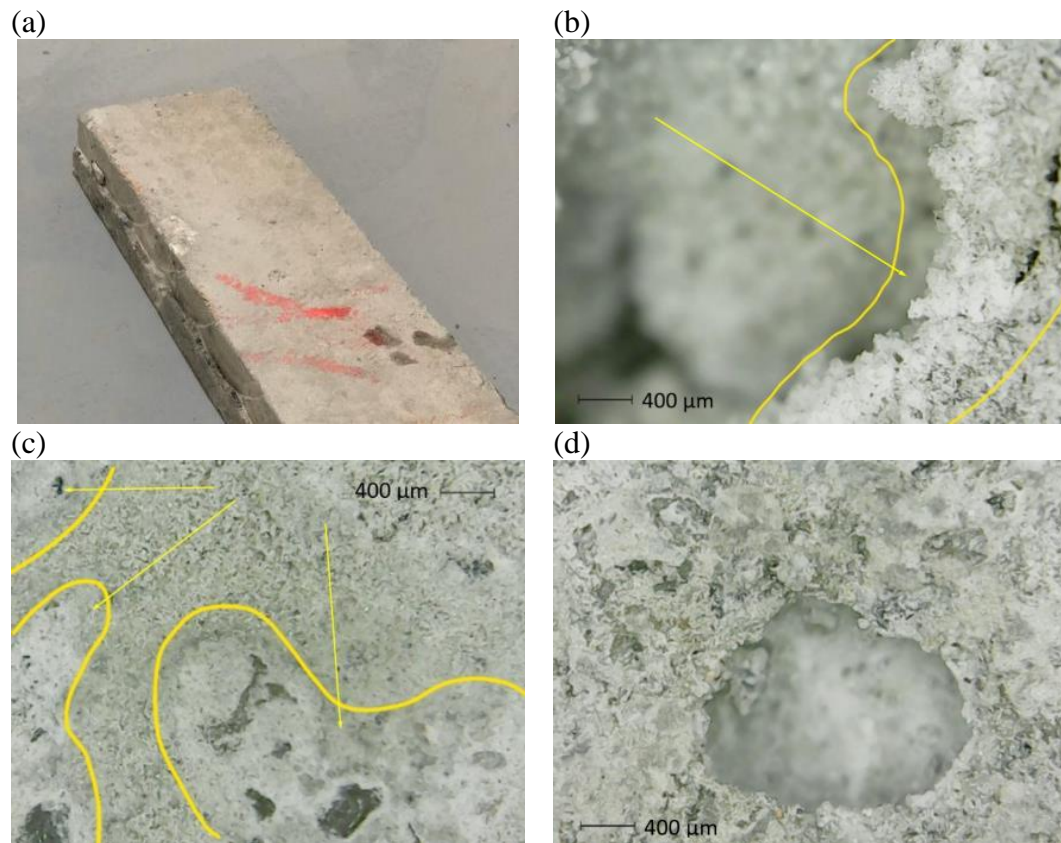


Figura 15. Microscopia: (a) Painel cortado ao meio, (b) Painel com cristalizante misturado ao concreto, (c) Painel com o cristalizante aplicado sobre, (d) Painel de referência.

Nos painéis com a aplicação do aditivo incorporado ao concreto (C CRI), foi possível observar poucos cristais nas superfícies dos poros, podendo indicar um processo de cristalização iniciante. Já nos painéis com aplicação superficial do cristalizante (C CRI SOB), foi possível observar uma maior colmatação, estando muitos completamente obstruídos pelos cristais.

4. CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados, pode-se retratar uma semelhança nos dados obtidos dos ensaios, os quais apresentam o mesmo comportamento quanto a capacidade de absorção e permeabilidade dos painéis. Apontando as amostras com o aditivo cristalizante aplicado superficialmente, com a menor permeabilidade de água, e as amostras com o aditivo misturado ao concreto, com os maiores valores de vazios e absorção de água.

O desempenho superior dos painéis com aplicação superficial pode ser explicado pela alta concentração do aditivo na face, obtendo uma maior capacidade de cristalização já que os cristais provenientes da cura do concreto se encontram completamente hidratados, desta forma o aditivo consegue ter um desempenho inicial mais efetivo.

Os painéis com aditivo misturado ao concreto apresentam maior absorção em todos os ensaios e maior índice de vazios após o tempo submerso. Isso acontece por seu processo de cristalização não ter finalizado, pois ele utiliza a água e os cristais provenientes da hidratação do cimento, os quais estão em formação simultaneamente aos cristais do aditivo tornando o processo mais lento, não sendo possível observar melhoras após 28 dias de cura submersa.

Apesar de não ter apresentado colmatação da fissura após o tempo de cura, o processo de cristalização estava presente nas fissuras, sendo necessário mais tempo em contato para que possivelmente a colmatação finalizasse.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de concreto de maior resistência, com no mínimo 20 Mpa. Realizar os mesmos ensaios, porém verificando os resultados após 1, 20, 40, 60 e 90 dias após o processo de cura submersa, a fim de verificar a evolução do processo e acompanhar a colmatação dos poros ao longo do tempo.

5. REFERÊNCIAS

- Araújo, M. D., Saviatoo, M. S. C. (2018), *Estudo da influência de aditivo impermeabilizante em concreto*. 83 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4666>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.992: Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.575: Edificações habitacionais- Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9574: Execução de impermeabilização*. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7610: Concreto — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2015.

- Huang, H., Ye, G., Pel, L. (2016), *New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests*. Materials and Structures 49, no. 7, p. 2509-2524. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0664-9>
- Marin, J. S., Brasil, K. F. (2016), *Controle da retração plástica em lajes de cobertura de concreto armado*. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14309>
- Neville, A. M. (2016), *Propriedades do concreto*. 5 ed. Porto Alegre: Bookman.
- Pazderka, J., Hajková, E. (2016), *Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete*. Journal of Advanced Engineering. Praga, República Checa. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>
- Takagi, E. M., Almeida, W. J., Oliveira, F. S. (2007), *Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estrutura de concreto armado*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, Florianópolis.
- VEDACIT (2013), *Manual técnico de impermeabilização de estruturas*. 7ª edição. Disponível em: <https://www.vedanews.com.br/uploads/biblioteca/manual-tecnico-impermeabilizacao-de-estruturas-7.pdf> (acesso: 11 de julho de 2019).

Um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares levando em consideração que a superfície de contato funciona parcialmente em compressão

A. Luévanos Rojas^{1*} 

* Autor de Contato: arnulfol_2007@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.671>

Recebido: 21/02/2023 | Correções recebidas: 13/04/2023 | Aceito: 20/04/2023 | Publicado: 01/30/2023

RESUMO

Este artigo mostra um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares sob flexão uniaxial e biaxial, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente à compressão. A metodologia é apresentada por integração para obter momentos, cisalhamento por flexão e punção. Exemplos numéricos são apresentados para o projeto de fundações isoladas retangulares sob flexão uniaxial e biaxial e são comparados ao modelo atual (a área total funciona em compressão) em termos de volumes de concreto e aço. O modelo atual mostra maiores volumes de concreto e aço. Portanto, o novo modelo é o mais apropriado, pois apresenta melhor controle de qualidade nos recursos utilizados.

Palavras-chave: fundações isoladas retangulares; novo modelo para dimensionamento completo; momentos; cisalhamento de flexão; punção.

Citar como: Luévanos Rojas, A. (2023), “Um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares levando em consideração que a superfície de contato funciona parcialmente em compressão”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 192 – 219, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.671>

¹ Instituto de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho houve apenas um autor.

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 primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

New model for complete design of rectangular isolated footings taking into account that the contact surface works partially in compression

ABSTRACT

This paper shows a new model for complete design of rectangular isolated footings under uniaxial and biaxial bending, considering that the footing area in contact with the soil partially works to compression. The methodology is presented by integration to obtain moments, flexural shearing and punching shearing. Numerical examples are presented for design of rectangular isolated footings under uniaxial and biaxial flexion and are compared with the current model (total area works in compression) in terms of concrete and steel volumes. The current model shows greater volumes of concrete and steel. Therefore, the new model is the most appropriate, since it presents better quality control in the resources used.

Keywords: rectangular isolated footings; new model for complete design; moments; flexural shearing; punching shearing.

Nuevo modelo para el diseño completo de zapatas aisladas rectangulares tomando en cuenta que la superficie de contacto funciona parcialmente en compresión

RESUMEN

Este documento muestra un nuevo modelo para diseño completo de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, tomando en cuenta que el área de la zapata en contacto con el suelo funciona parcialmente a compresión. La metodología se presenta por integración para obtener momentos, cortantes por flexión y penetración. Los ejemplos numéricos se presentan para el diseño de zapatas aisladas rectangulares bajo flexión uniaxial y biaxial, y se comparan con el modelo actual (área total funciona en compresión) en términos de volúmenes de concreto y acero. El modelo actual muestra mayores volúmenes de concreto y acero. Por lo tanto, el nuevo modelo es el más adecuado, ya que presenta mejor control de calidad en los recursos utilizados.

Palabras clave: zapatas aisladas rectangulares; nuevo modelo para diseño completo; momentos; cortante por flexión; cortante por penetración.

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 dimensionamento de sapatas rasas apoiadas no solo depende das cargas e momentos fornecidos pelos pilares.

A Figura 1 mostra a distribuição da pressão do solo sob a sapata rígida que depende do tipo de solo e a posição da força resultante aplicada no centro de gravidade da fundação. A Figura 1(a) apresenta uma base apoiada em solo arenoso. A Figura 1(b) mostra uma fundação apoiada em solo argiloso. A Figura 1(c) apresenta a distribuição uniforme da pressão do solo usada no projeto atual.

A capacidade portante foi investigada para sapatas rasas submetidas à flexão biaxial, que leva em consideração uma distribuição linear de pressão do solo e essa área de contato funciona parcialmente em compressão (Irles-Más e Irles-Más , 1992 ; Ozmen , 2011 ; Rodriguez- Gutierrez e Aristizabal -Ochoa, 2013a, b; Lee e outros, 2015; Kaur e Kumar, 2016; bezmalinovic Coleoni , 2016; Dagdeviren , 2016; Aydogdu , 2016; Girgin , 2017; Turedi et al., 2019; Al- Gahtani e Adekunle , 2019; Galvis e Smith-Pardo, 2020; Rawat et al ., 2020; Lezgy-Nazargah et al ., 2022; Gor , 2022).

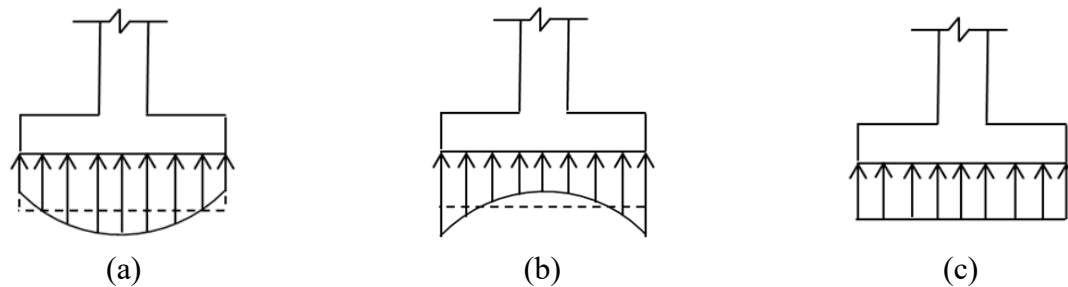


Figura 1. Distribuição de pressão sob a sapata
Fonte: Elaboração própria

Modelos matemáticos para o dimensionamento de fundações: para sapatas isoladas foram desenvolvidos para formas quadradas, circulares e retangulares (Algin , 2000, 2007; Luévanos -Rojas, 2012a, b, 2013, 2014a, 2015a; Luévanos -Rojas et al., 2013 , 2014b, 2016b, e outros, 2017; Filho et al., 2017; López-Chavarría et al., 2017a, c, 2019; khajehzadeh et al . , 2014); Para sapatas combinadas retangulares, trapezoidais, de canto, em forma de T e em tiras (Jahanandish et al., 2012; Luévanos -Rojas, 2014c, 2015b, c, d, 2016a, b, et al . , 2018a, b, 2020; López -Chavarría et al., 2017b; Velázquez-Santillán et al., 2019; Aguilera-Mancilla et al., 2019; Yáñez-Palafox e outros, 2019). Esses trabalhos levam em consideração a área total de contato que trabalha sob compressão.

Os modelos mais próximos deste artigo são: Soto-García et al. (2022) propuseram um modelo matemático para obter a área mínima para sapatas circulares isoladas, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente em compressão; este modelo apresenta um caso porque a análise é desenvolvida para o momento resultante. Vela-Moreno et al. (2022) desenvolveu um modelo matemático para encontrar a superfície mínima para sapatas retangulares isoladas, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente em compressão. Este modelo mostra cinco casos para flexão biaxial, dois para flexão uniaxial flexão (a carga está no eixo X) e outros dois para flexão uniaxial (a carga está no eixo Y). Kim-Sanchez et al. (2022) apresentou um modelo matemático para obtenção da espessura e das áreas de aço transversais e longitudinais para sapatas circulares isoladas, levando em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente em compressão. Esta pesquisa apresenta um novo modelo analítico para obter um dimensionamento completo (espessuras e áreas de aço transversal e longitudinal) para sapatas retangulares isoladas, levando

em consideração que a área da sapata em contato com o solo funciona parcialmente sob compressão, este modelo baseia-se na área de contato com o solo (laterais da sapata) do modelo proposto por Vela-Moreno et al. (2022). A formulação do novo modelo é desenvolvida por integração para encontrar os momentos, os cisalhamentos de flexão e punção sob os critérios do código (ACI 318S-19). Outros autores apresentam as equações para encontrar o dimensionamento completo de uma sapata retangular isolada, mas consideram a área total trabalhando sob compressão. Exemplos numéricos são mostrados para encontrar o dimensionamento completo de sapatas retangulares isoladas sob carga axial e momentos em uma e duas direções, e os resultados são comparados com os de outros autores para observar as diferenças. As áreas de contato com o solo apresentadas neste documento são baseadas no trabalho proposto por Vela-Moreno et al. (2022). Este modelo terá seu impacto na construção civil com menores custos (materiais e mão de obra).

2. FORMULAÇÃO DO NOVO MODELO

Uma sapata isolada retangular rígida deforma-se de forma plana, ou seja, a distribuição da pressão do solo sob a sapata é considerada linear.

A equação geral para qualquer sapata sujeita a flexão biaxial sob uma carga axial fatorada e dois momentos ortogonais fatorados é:

$$\sigma_u(x, y) = \frac{P_u}{h_x h_y} + \frac{12M_{ux}y}{h_x h_y^3} + \frac{12M_{uy}x}{h_x^3 h_y} \quad (1)$$

onde: σ_u é a pressão fatorada gerada pelo solo devido à carga axial fatorada e aos momentos fatorados aplicados na sapata, P_u é a carga axial fatorada, M_{ux} é o momento fatorado no eixo X, M_{uy} é o momento fatorado no eixo Y, h_x e h_y são os lados da sapata, x e y são as coordenadas onde está localizada a pressão gerada pelo solo.

A equação de flexão biaxial pode ser aplicada quando a força resultante P_u está localizada dentro do núcleo central (área trabalhando totalmente em compressão), e quando a força resultante P_u está fora do núcleo central (área trabalhando parcialmente em compressão) não é válida.

Quando a força resultante P_u está fora do núcleo central, as equações gerais para a pressão do solo sob a sapata submetida à flexão uniaxial e biaxial são:

Flexão uniaxial (P_u está localizado no eixo Y):

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}(2h_{y1} - h_y + 2y)}{2h_{y1}} \quad (2)$$

Flexão uniaxial (P_u está localizado no eixo X):

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}(2h_{x1} - h_x + 2x)}{2h_{x1}} \quad (3)$$

Flexão biaxial:

$$\sigma_z(x, y) = \frac{\sigma_{umax}[h_{y1}(2x - h_x) + h_{x1}(2y - h_y) + 2h_{x1}h_{y1}]}{2h_{x1}h_{y1}} \quad (4)$$

onde: σ_{umax} é a pressão fatorada máxima gerada pelo solo devido à carga axial fatorada e aos momentos fatorados aplicados na sapata.

As seções críticas para os momentos estão localizadas nos eixos $a-a$ e $b-b$, para as seções críticas

para a flexão estão localizadas nos eixos $c-c$ e $e-e$, e a seção crítica para a punção ocorre no perímetro formado pelos pontos 5, 6, 7 e 8 (ACI 318S-19).

2.1. Sapata retangular isolada submetida à flexão uniaxial

A Figura 2 mostra os quatro casos possíveis para se obter a área mínima de uma sapata retangular isolada submetida à flexão uniaxial. Dois casos quando P está localizado no eixo Y : 1) quando P está localizado dentro do núcleo central; 2) quando P está fora do núcleo central. Dois casos quando P está localizado no eixo X : 1) quando P está localizado dentro do núcleo central; 2) quando P está fora do núcleo central.

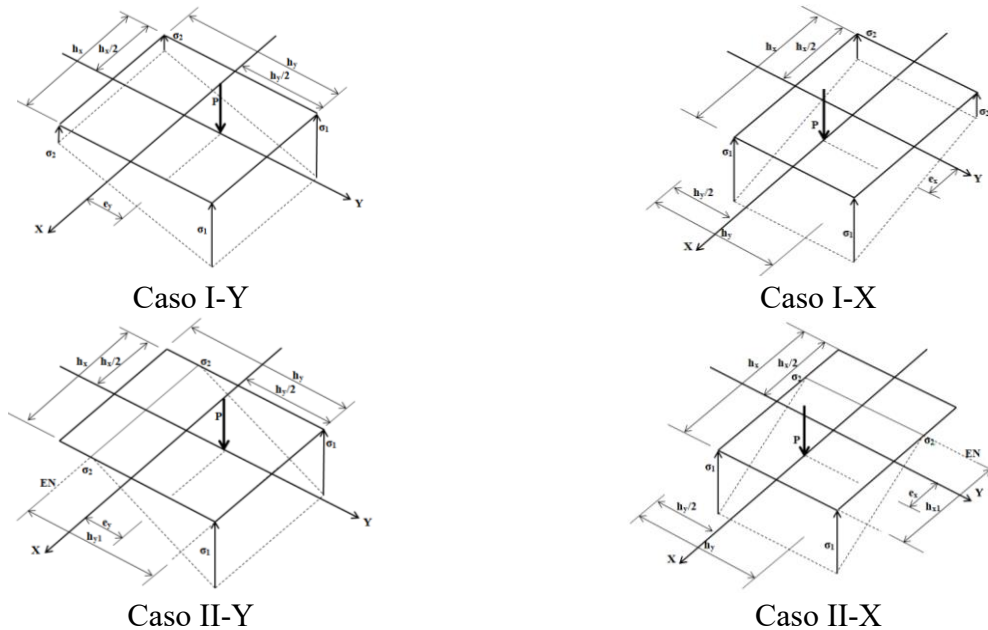


Figura 2. Quatro possíveis casos de área mínima para flexão uniaxial

Fonte: Elaboração própria baseada em Vela-Moreno et al. (2022)

A Figura 3 mostra as seções críticas para momentos fletores e cortantes por flexão para quatro casos possíveis: Caso I-Y quando P está localizado no eixo Y , e dentro do núcleo central. Caso II-Y quando P está localizado no eixo Y , e fora do núcleo central: Caso II-YA quando o eixo neutro está localizado $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2$ (momento) e $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexão); Caso II-YB quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2$ (momento) e $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexão). Caso I-X quando P está localizado no eixo X e dentro do núcleo central. Caso II-X quando P está localizado no eixo X e fora do núcleo central; Caso II-XA quando a linha neutra está localizada $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2$ (momento) e $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexão); Caso II-XB quando a linha neutra está localizada $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2$ (momento) e $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexão).

2.1.1. Cortantes e momentos por flexão

As equações gerais nos eixos “ c ” e “ e ” para os momentos de flexão fatorados “ V_{uc} ” e “ V_{ue} ”, e nos eixos “ a ” e “ b ” para os momentos fatorados “ M_{ua} ” e “ M_{ub} ” são:

Caso I-Y

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) dx dy \tag{5}$$

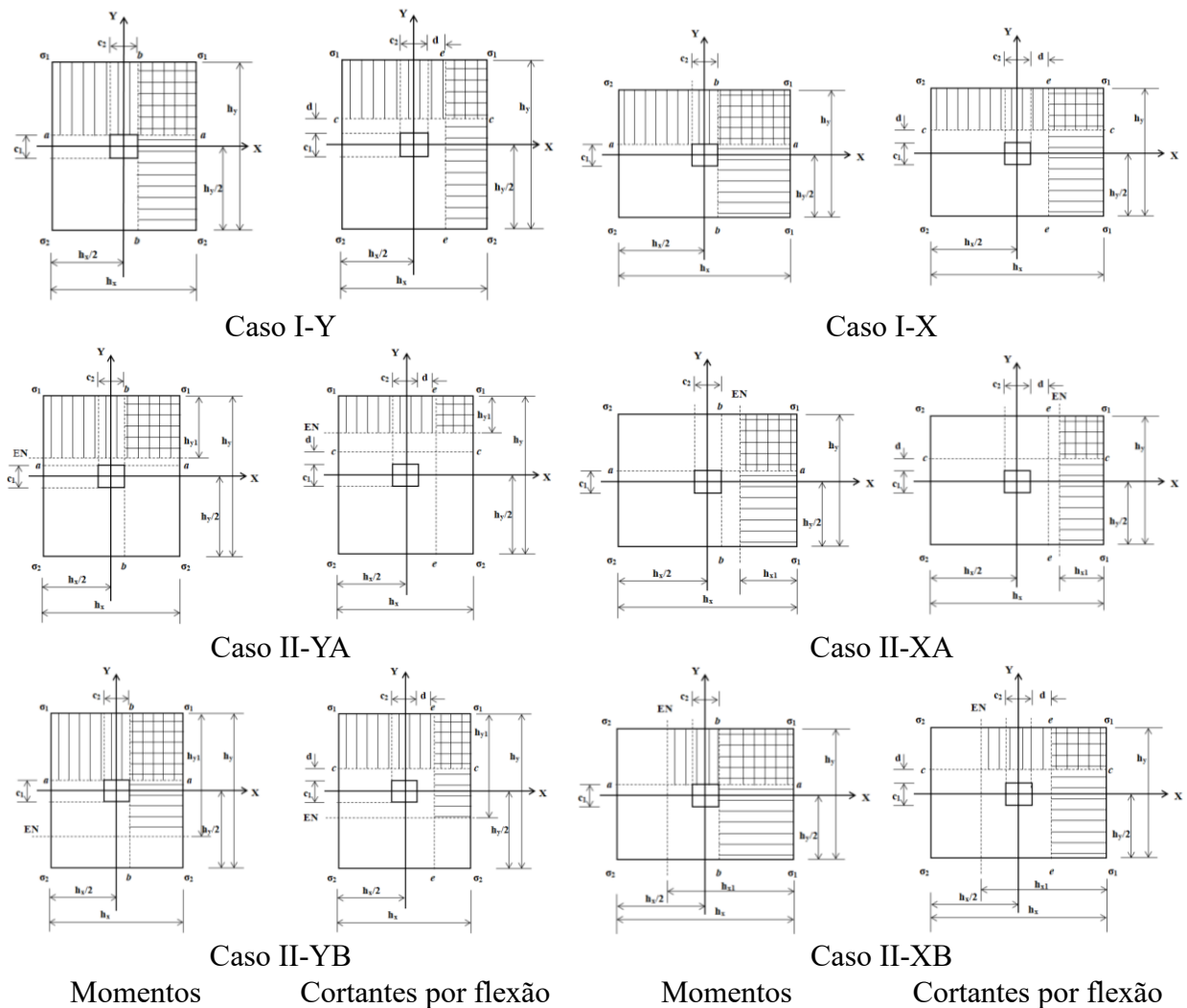
$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_u(x, y) dy dx \tag{6}$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_u(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \tag{7}$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_u(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \tag{8}$$

onde: d é a profundidade efetiva da sapata, c_1 e c_2 são os lados do pilar.

Nota: A Equação (1) é substituída nas Equações (5) a (8) e $M_{uy} = 0$, e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.



Fonte: Elaboração própria

Caso II-YA

Para $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2$ (momento) são:

$$V_{uc} = \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (9)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2} + d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (10)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (11)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (12)$$

Caso II-YB

Para $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2$ (momento) são:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2} + d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (13)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2} + d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (14)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (15)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (16)$$

Nota: a equação (2) é substituída nas equações (9) a (16) e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.

Caso I-X

As equações gerais nos eixos “c” e “e” para as cortantes por flexão fatorados “ V_{uc} ” e “ V_{ue} ”, e nos eixos “a” e “b” para os momentos fatorados “ M_{ua} ” e “ M_{ub} ” são as equações (5) a (8). Mas nessas equações $M_{ux} = 0$ é substituído e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.

Caso II-XA

Para $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2$ (momento) são:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (17)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (18)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (19)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (20)$$

Caso II-XB

Para $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2$ (momento) são:

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (21)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (22)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (23)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (24)$$

Nota: a equação (3) é substituída nas equações (17) a (24) e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.

2.1.2. Cortante por punção

A Figura 4 mostra as seções críticas de punção para quatro casos possíveis: Caso I-Y quando P está localizado no eixo Y, e dentro do núcleo central. Caso II-Y quando P está localizado no eixo Y, e fora do núcleo central: Caso II-YA quando o eixo neutro está localizado $h_y/2 - h_{y1} \geq c_1/2 + d/2$; Caso II-YB quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y1} \leq c_1/2 + d/2$. Caso I-X quando P está localizado no eixo X e dentro do núcleo central. Caso II-X quando P está localizado no eixo X, e fora do núcleo central: Caso II-XA quando o eixo neutro está localizado $h_x/2 - h_{x1} \geq c_2/2 + d/2$; Caso II-XB quando a linha neutra está localizada $h_x/2 - h_{x1} \leq c_2/2 + d/2$.

A equação geral para cortante por punção fatorada “ V_{up} ” é:

Caso I-Y

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_1-d}{2}}^{\frac{c_1+d}{2}} \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \sigma_u(x, y) dx dy \quad (25)$$

Nota: A Equação (1) é substituída na Equação (25) e $M_{uy} = 0$, e a integral é desenvolvida para obter a equação final.

Caso II-YA

Para $h_y/2 - h_{yl} \geq c_1/2 + d/2$ é:

$$V_{up} = P_u \quad (26)$$

Caso II-YB

Para $h_y/2 - h_{yl} \leq c_1/2 + d/2$ é:

$$V_{up} = P_u - \int_{y_s}^{\frac{c_1+d}{2}} \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (27)$$

onde: $-c_1/2 - d/2 \leq y_s \leq c_1/2 + d/2$

Nota: a equação (2) é substituída na equação (27) e a integral é desenvolvida para obter a equação final.

Caso I-X

A equação (1) é substituída na equação (25) e $M_{ux} = 0$ e a integral é desenvolvida para obter a equação final.

Caso II-XA

Para $h_x/2 - h_{xl} \geq c_2/2 + d/2$ é a equação (26).

Caso II-XB

Para $h_x/2 - h_{xl} \leq c_2/2 + d/2$ é:

$$V_{up} = P_u - \int_{x_s}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{-\frac{c_1-d}{2}}^{\frac{c_1+d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (28)$$

onde: $-c_2/2 - d/2 \leq x_s \leq c_2/2 + d/2$.

Observação: a equação (3) é substituída na equação (28) e a integral é desenvolvida para obter a equação final.

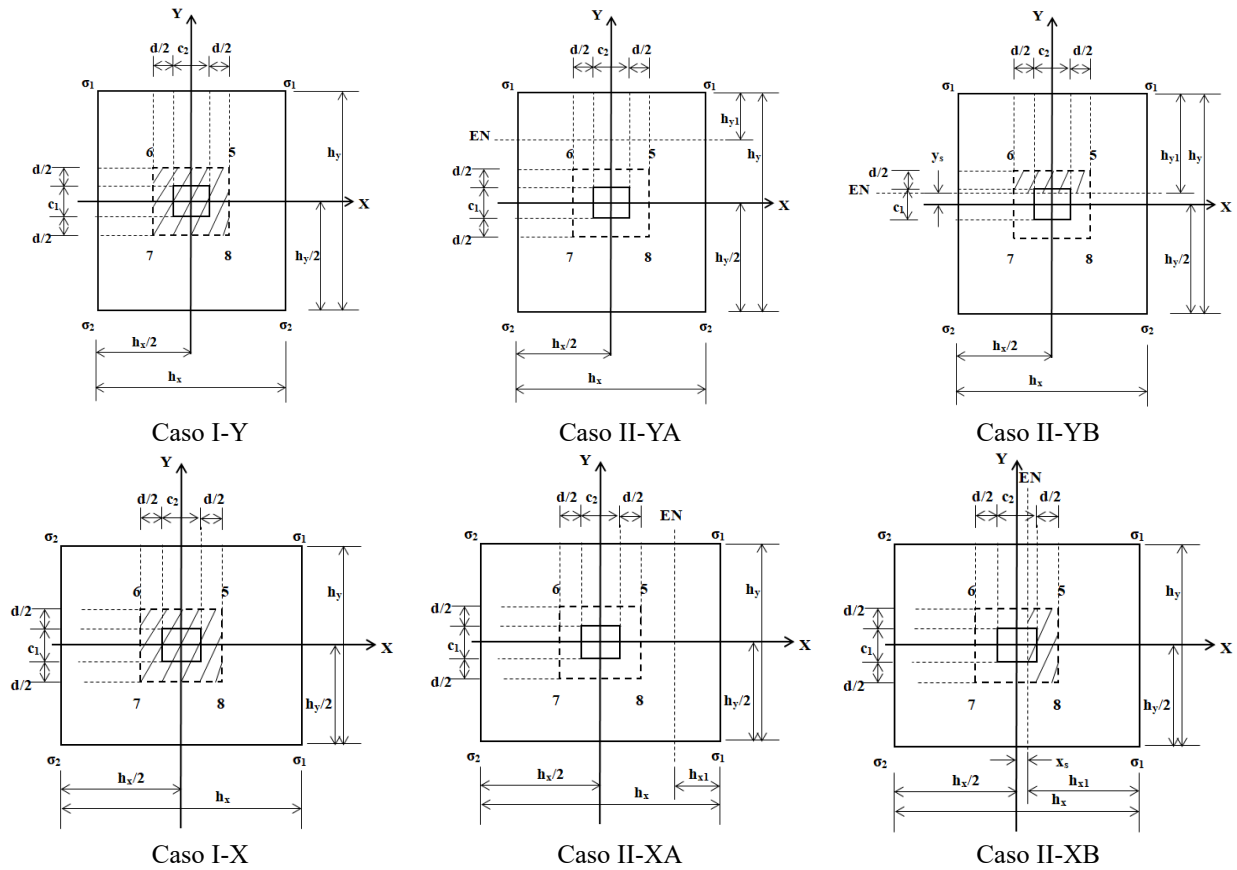


Figura 4. Cortante de punção para flexão uniaxial

Fonte: Elaboração própria

2.2. Sapata isolada retangular submetida a flexão biaxial

A Figura 5 mostra os cinco casos possíveis para obtenção da área mínima de uma sapata retangular isolada submetida à flexão biaxial.

Para o caso I, considera-se que a superfície total da sapata trabalha sob compressão. A pressão gerada pelo solo na sapata é obtida pela equação (1) (flexão biaxial).

Para os casos II, III, IV e V, considera-se que a superfície total da sapata trabalha parcialmente sob compressão, ou seja, parte da superfície tem pressão nula. A pressão gerada pelo solo na sapata é obtida pela equação (4).

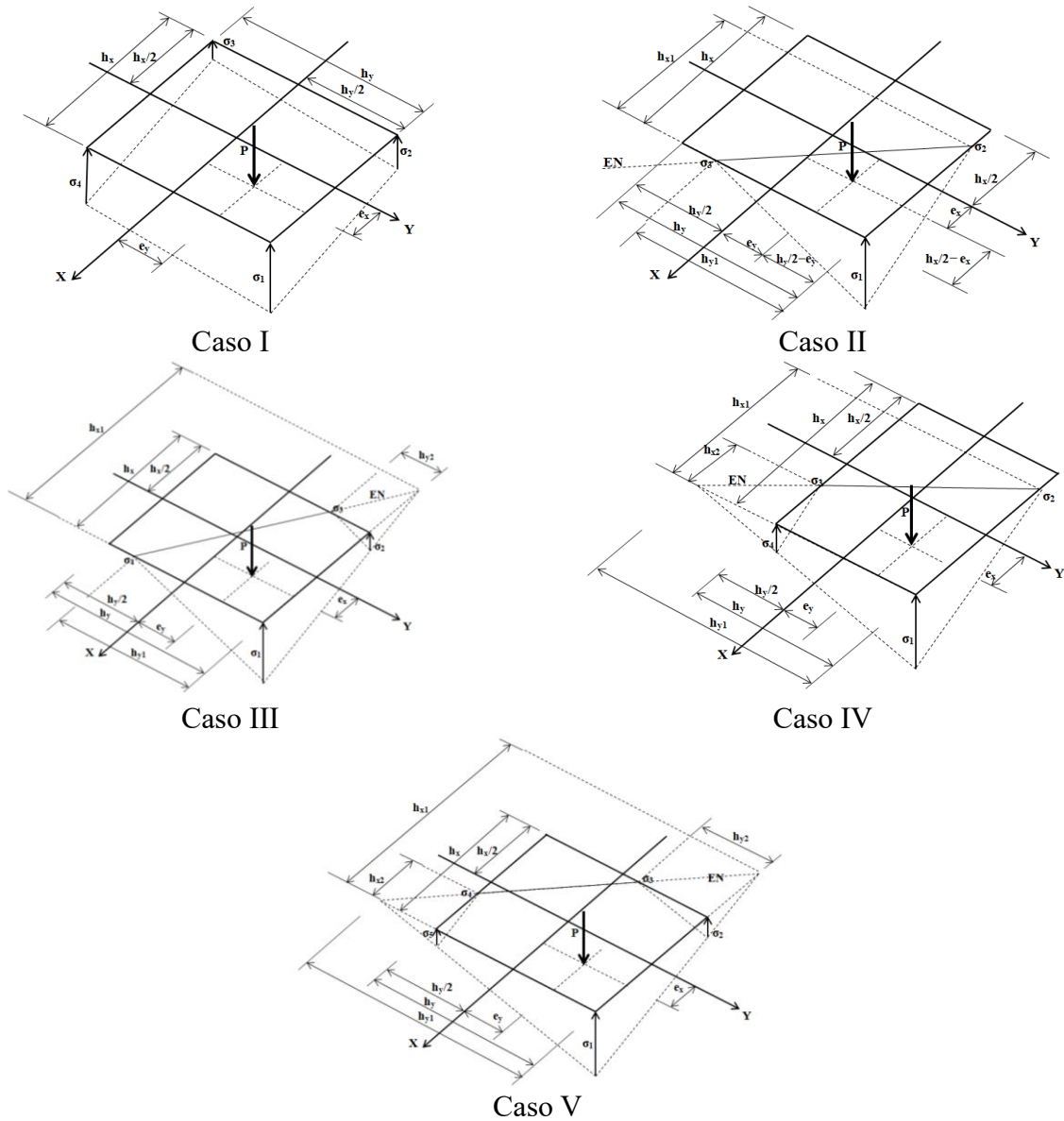


Figura 5. Cinco possíveis casos de área mínima para flexão biaxial
 Fonte: Elaboração própria baseada em Vela-Moreno et al. (2022)

2.2.1. Cortantes por flexão e momentos

A Figura 6 mostra as seções críticas para momentos fletores e cortantes por flexão para todos os casos possíveis.

As equações gerais nos eixos “c” e “e” para os esforços de flexão fatorados “ V_{uc} ” e “ V_{ue} ”, nos eixos “a” e “b” para os momentos fatorados “ M_{ua} ” e “ M_{ub} ” são:

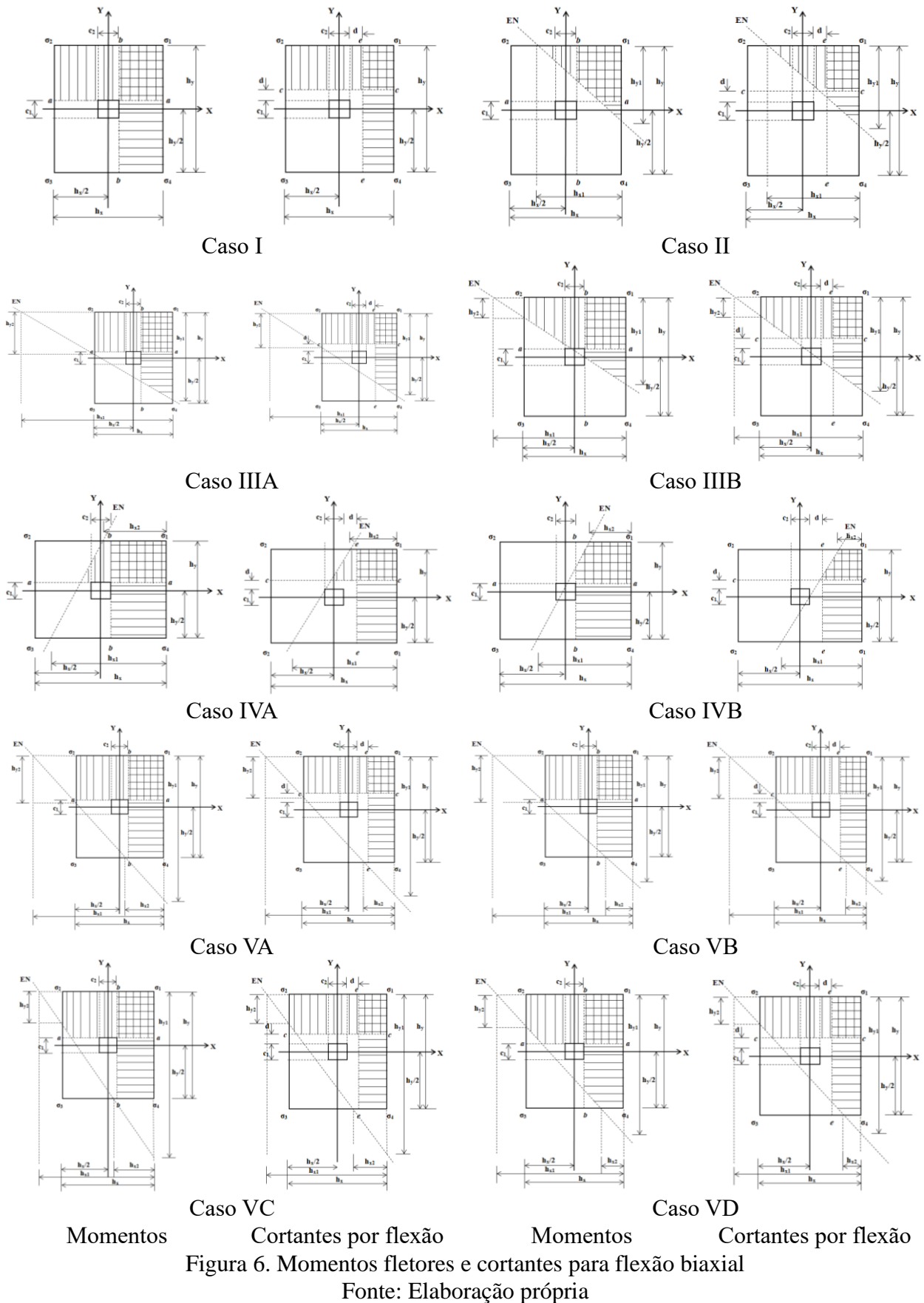


Figura 6. Momentos fletores e cortantes para flexão biaxial

Fonte: Elaboração própria

Caso I

Quando P está localizado dentro do núcleo central.

A equação (1) é substituída nas equações (5) a (8) e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.

Caso II

Quando P está localizado fora do núcleo central.

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (29)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (30)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (31)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (32)$$

Caso III

Quando P está localizado fora do núcleo central de dois casos possíveis: Caso IIIA quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ (momento) e $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ (cortante por flexão); Caso IIIB quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ (momento) e $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ (cortante por flexão).

Caso IIIA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (33)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (34)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2} \right) dx dy \quad (35)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2} \right) dy dx \quad (36)$$

Caso IIIB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (37)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (38)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (39)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (40)$$

donde: $h_{y2} = h_{y1}(h_{x1} - h_x)/h_{x1}$.

onde: $h_{y2} = h_{y1}(h_{x1} - h_x)/h_{x1}$.

Caso IV

Quando P está localizado fora do núcleo central de dois casos possíveis: Caso IVA quando a linha neutra está localizada $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento) e $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexão); Caso IVB quando a linha neutra está localizada $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento) e $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexão).

Caso IVA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (41)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (42)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (43)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (44)$$

Caso IVB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (45)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (46)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (47)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (48)$$

onde: $h_{x2} = h_{x1}(h_{y1} - h_y)/h_{y1}$.

Caso V

Quando P está localizado fora do núcleo central de quatro casos possíveis: Caso VA quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ e $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexão), e $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ e $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento); Caso VB quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2 + d$ e $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_y/2 - h_{y2} \leq c_1/2$ e $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento); Caso VC quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ e $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ e $h_x/2 - h_{x2} \leq c_2/2$ (momento); Caso VD quando a linha neutra está localizada $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2 + d$ e $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2 + d$ (cortante por flexão) e $h_y/2 - h_{y2} \geq c_1/2$ e $h_x/2 - h_{x2} \geq c_2/2$ (momento).

Caso VA

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (49)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (50)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (51)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dydx \quad (52)$$

Caso VB

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (53)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (54)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (55)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (56)$$

Caso VC

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (57)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (58)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (59)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (60)$$

Caso VD

$$V_{uc} = \int_{\frac{c_1}{2}+d}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \quad (61)$$

$$V_{ue} = \int_{\frac{c_2}{2}+d}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (62)$$

$$M_{ua} = \int_{\frac{c_1}{2}}^{\frac{h_y}{2}-h_{y2}} \int_{\frac{h_x}{2} + \frac{h_{x1}(h_y-2y)}{2h_{y1}} - h_{x1}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy + \int_{\frac{h_y}{2}-h_{y2}}^{\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \sigma_z(x, y) \left(y - \frac{c_1}{2}\right) dx dy \quad (63)$$

$$M_{ub} = \int_{\frac{c_2}{2}}^{\frac{h_x}{2}-h_{x2}} \int_{\frac{h_y}{2} + \frac{h_{y1}(h_x-2x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx + \int_{\frac{h_x}{2}-h_{x2}}^{\frac{h_x}{2}} \int_{-\frac{h_y}{2}}^{\frac{h_y}{2}} \sigma_z(x, y) \left(x - \frac{c_2}{2}\right) dy dx \quad (64)$$

Nota: a equação (4) é substituída nas equações (29) a (64) e as integrais são desenvolvidas para obter as equações finais.

2.2.2. Cortante por puncionamento

Figura 7 mostra as seções críticas para puncionamento de seis casos possíveis (Perímetro crítico formado pelos pontos 5, 6, 7 e 8).

Para o caso I considera-se que a superfície total da sapata trabalha sob compressão. A pressão gerada pelo solo na sapata é obtida pela equação (1) (flexão biaxial).

Para os casos II, III, IV, V e VI, considera-se que a superfície total da sapata trabalha parcialmente sob compressão, ou seja, parte da superfície tem pressão nula. A pressão gerada pelo solo na sapata é obtida pela equação (4).

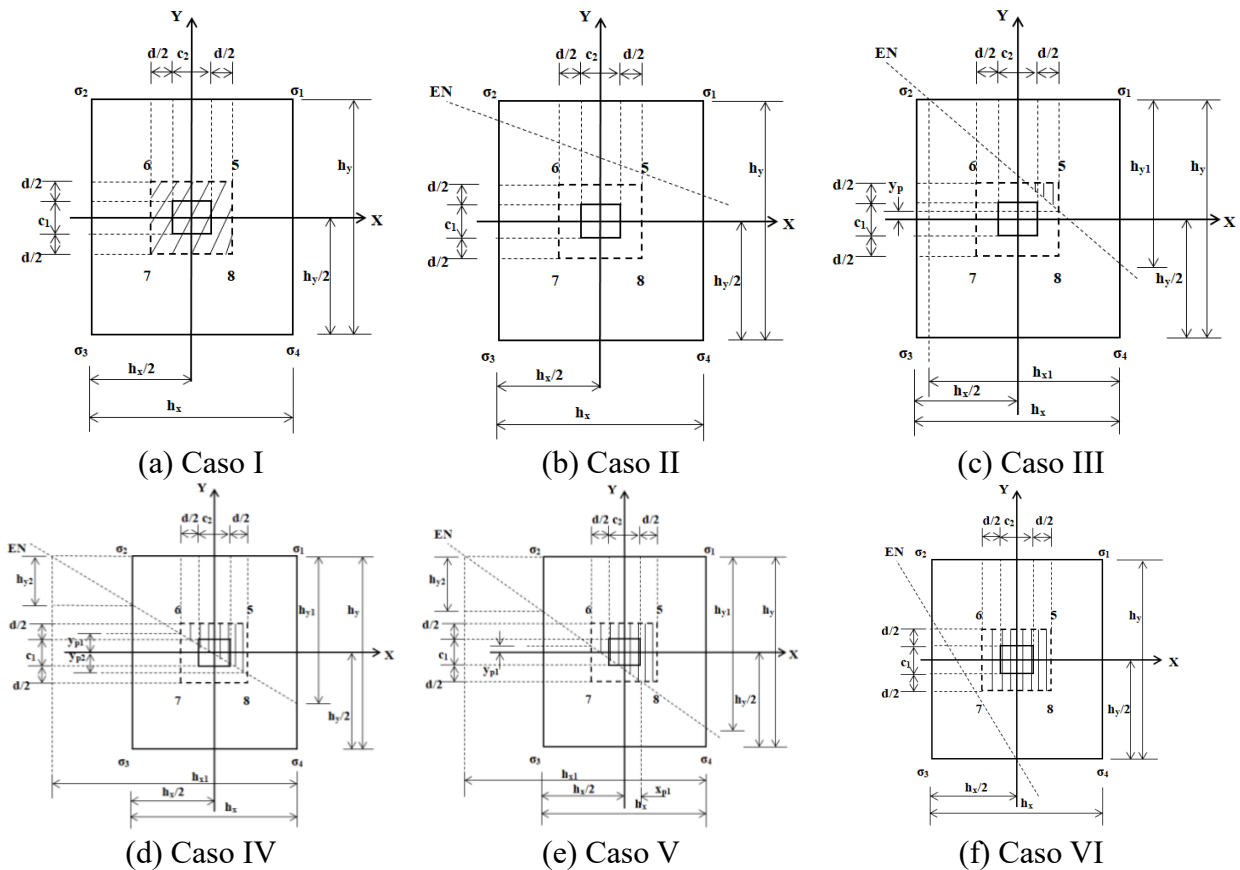


Figura 7. Cortantes por punção para flexão biaxial

Fonte: Elaboração própria

A equação geral para cortante por punção fatorada “ V_{up} ” é:

Caso I

A equação (1) é substituída na equação (25) e a integral é desenvolvida para obter a equação final.

Caso II

A linha neutra não atinge o perímetro da seção crítica, portanto, é a equação (26).

Caso III

$$V_{up} = P_u - \int_{y_p}^{\frac{c_1}{2} + \frac{d}{2}} \int_{\frac{h_x}{2} - \frac{h_{x1}(2y-h_y)}{2h_{y1}}}^{\frac{c_2}{2} + \frac{d}{2}} \sigma_z(x, y) dx dy \tag{65}$$

onde: $y_p = h_y/2 - h_{y1}(c_2 + d - h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$ (Se a linha neutra cruzar o perímetro crítico no lado formado pelos pontos 5 e 8) e $y_p = -c_1/2 - d/2$ (Se a linha neutra cruzar o perímetro crítico no lado formado pelos pontos 7 e 8).

Caso IV

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - \frac{h_{y1}(2x-h_x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx - \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{y_{p1}}^{\frac{c_1+d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (66)$$

onde: $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Caso V

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{\frac{h_y}{2} - \frac{h_{y1}(2x-h_x)}{2h_{x1}} - h_{y1}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx - \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{y_{p1}}^{\frac{c_1+d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx - \int_{x_{p1}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{-\frac{c_1-d}{2}}^{y_{p1}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (67)$$

onde: $x_{p1} = h_x/2 - h_{x1}(c_1 + d - h_y)/2h_{y1} - h_{x1}$ e $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Caso VI

$$V_{up} = P_u - \int_{-\frac{c_2-d}{2}}^{\frac{c_2+d}{2}} \int_{-\frac{c_1-d}{2}}^{\frac{c_1+d}{2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (68)$$

onde: $x_{p1} = h_x/2 - h_{x1}(c_1 + d - h_y)/2h_{y1} - h_{x1}$ y $y_{p1} = h_y/2 + h_{y1}(c_2 + d + h_x)/2h_{x1} - h_{y1}$.

Nota: A equação (4) é substituída nas equações (65) a (68) e a integral é desenvolvida para obter as equações finais.

3. RESULTADOS

Esta seção descreve a aplicação do novo modelo apresentado neste artigo, usando os mesmos exemplos para obter a área mínima e os lados de uma sapata retangular isolada proposta por Vela-Moreno et al., (2022).

As Tabelas 1 e 2 apresentam os quatro casos para obtenção do dimensionamento completo das sapatas isoladas retangulares submetidas à flexão uniaxial. Dois casos em que a carga axial está no eixo Y: Caso I-Y, quando toda a área de contato trabalha sob compressão; Caso II-Y, quando a área de contato trabalha parcialmente em compressão. Dois casos em que a carga axial está no eixo X: Caso IX, quando toda a área de contato trabalha sob compressão; Caso II-X, quando a área de contato trabalha parcialmente em compressão.

A Tabela 1 mostra os resultados para $c_1 = c_2 = 0.40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 0$ kN-m e $\sigma_{umax} = 250$ kN/m².

O procedimento utilizado é o seguinte:

Para o caso I-Y: Substituindo $P_u, M_{ux}, M_{uy} = 0, h_x, h_y$ na equação (1), e subsequentemente substituindo a equação (1), h_x, h_y, c_1, c_2 e d em equações (5) a (8) e (25).

Para o caso II-Y: Substituindo $\sigma_{umax}, h_y, h_{y1}$ na equação (2) e subsequentemente substituindo a equação (2), $h_x, h_y, h_{y1}, c_1, c_2$ e d nas equações (9) a (12) ou (13) a (16) e (26) ou (27) conforme o caso.

O valor de d é fixado pelas equações propostas por (ACI 318S-19).

Tabela 1. Dimensionamento completo da sapata quando a carga axial está no eixo Y.

(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M _{ux} kN-m	h _x m	h _y m	d cm	M _{ua} kN-m	M _{ub} kN-m	V _{uc} kN	V _{uc} kN	V _{up} kN	A _{smy} cm ²	A _{sminy} cm ²	A _{spy} cm ²	A _{smx} cm ²	A _{sminx} cm ²	A _{spx} cm ²
I-Y	360	1.00	3.65	52	410.97	32.40	342.89	*	553.04	22.00	17.32	22.80 (8Ø3/4")	1.65	63.20	65.55 (23Ø3/4")
II-Y		1.33	3.00	32	240.38	40.54	272.63	54.38	655.20	21.10	14.17	22.80 (8Ø3/4")	3.37	31.97	34.20 (12Ø3/4")
I-Y	720	1.00	6.00	67	794.45	32.40	420.46	*	582.61	33.32	22.31	34.20 (12Ø3/4")	1.28	133.87	136.89 (27Ø1")
II-Y		1.00	4.67	52	468.41	22.50	322.24	*	631.92	25.28	17.32	25.65 (9Ø3/4")	1.15	80.87	81.12 (16Ø1")
I-Y	1440	2.00	12.00	42	1693.21	115.20	500.88	136.80	699.83	130.51	27.97	131.82 (26Ø1")	7.27	167.83	172.38 (34Ø1")
II-Y		2.00	5.33	42	894.98	80.00	499.75	95.00	720.00	61.71	27.97	65.91 (13Ø1")	5.05	74.55	76.95 (27Ø3/4")
I-Y	2160	2.00	18.00	52	2592.81	115.20	510.05	100.80	703.07	161.36	34.63	162.24 (32Ø1")	5.87	311.69	314.34 (62Ø1")
II-Y		2.00	7.33	37	1268.16	80.00	350.12	107.50	720.00	109.86	24.64	111.54 (22Ø1")	5.73	90.31	91.20 (32Ø3/4")

onde: A_{smy} e A_{smx} são as áreas de aço geradas pelos momentos nos eixos *a* (direção Y) e *b* (direção X), A_{sminy} e A_{sminx} são as áreas mínimas de aço em ambas as direções, A_{spy} e A_{spx} são as propostas áreas de aço nas direções Y e X (ACI 318S-19). * O eixo está localizado fora da área da sapata.

A Tabela 2 mostra os resultados para c₁ e c₂ = 0,40 m, P_u = 720 kN, M_{ux} = 0 kN-m, M_{uy} = 360, 720, 1440, 2160 kN-m e σ_{umax} = 250 kN/m² (mesmo procedimento usado no Tabela 1, mas com as equações correspondentes).

Tabela 2. Projeto completo da sapata quando a carga axial está no eixo X.

(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M _{uy} kN-m	h _x m	h _y m	d cm	M _{ua} kN-m	M _{ub} kN-m	V _{uc} kN	V _{uc} kN	V _{up} kN	A _{smy} cm ²	A _{sminy} cm ²	A _{spy} cm ²	A _{smx} cm ²	A _{sminx} cm ²	A _{spx} cm ²
I-X	360	3.65	1.00	52	32.40	410.97	*	342.89	553.04	1.65	63.20	65.55 (23Ø3/4")	22.00	17.32	22.80 (8Ø3/4")
II-X		3.00	1.33	32	40.54	240.38	54.38	272.63	655.20	3.37	31.97	34.20 (12Ø3/4")	21.10	14.17	22.80 (8Ø3/4")
I-X	720	6.00	1.00	67	32.40	794.45	*	420.46	582.61	1.28	133.87	136.89 (27Ø1")	33.32	22.31	34.20 (12Ø3/4")
II-X		4.67	1.00	52	22.50	468.41	*	322.24	631.92	1.15	80.87	81.12 (16Ø1")	25.28	17.32	25.65 (9Ø3/4")
I-X	1440	12.00	2.00	42	115.20	1693.21	136.80	500.88	699.83	7.27	167.83	172.38 (34Ø1")	130.51	27.97	131.82 (26Ø1")
II-X		5.33	2.00	42	80.00	894.98	95.00	499.75	720.00	5.05	74.55	76.95 (27Ø3/4")	61.71	27.97	65.91 (13Ø1")
I-X	2160	18.00	2.00	52	115.20	2592.81	100.80	510.05	703.07	5.87	311.69	314.34 (62Ø1")	161.36	34.63	162.24 (32Ø1")
II-X		7.33	2.00	37	80.00	1268.16	107.50	350.12	720.00	5.73	90.31	91.20 (32Ø3/4")	109.86	24.64	111.54 (22Ø1")

As Tabelas 1 e 2 apresentam o dimensionamento completo das sapatas retangulares isoladas submetidas à flexão uniaxial.

A Tabela 1 mostra o seguinte: A super elevação efetiva é governada pela cortante por flexão no eixo *c* para ambos os casos (M_{ux} = 360, 720, 1440 kN-m) e pelo momento no eixo *a* para ambos os casos (M_{ux} = 2160 kN-m). A menor escala efetiva ocorre no caso II-Y para M_{ux} = 360, 720, 2160 kN-m, e para M_{ux} = 1440 kN-m a escala efetiva é a mesma nos casos I-Y e II-Y. A menor área de aço proposta aparece no caso II-Y para ambos os casos em ambas as direções exceto para M_{ux} =

360 kN-m que são os mesmos no caso I-Y e II-Y na direção Y.

A Tabela 2 mostra o seguinte: A superelevação efetiva é governada pela cortante por flexão no eixo *e* para ambos os casos ($M_{uy} = 360, 720, 1440$ kN-m), e pelo momento no eixo *b* para ambos os casos ($M_{uy} = 2160$ kN-m). A menor escala efetiva é apresentada no caso II-X para $M_{uy} = 360, 720, 2160$ kN-m, e para $M_{uy} = 1440$ kN-m a escala efetiva é a mesma no caso I-X e II-X. A menor área de aço proposta aparece no caso II-X para ambos os casos em ambas as direções exceto para $M_{uy} = 360$ kN-m que são iguais no caso I-X e II-X na direção X.

As Tabelas 3 a 6 apresentam o dimensionamento completo das sapatas isoladas submetidas à flexão biaxial.

As Tabelas 3 a 6 apresentam os dois casos para obtenção do dimensionamento completo de sapatas isoladas retangulares submetidas à flexão biaxial, um caso em que toda a área de contato trabalha em compressão (Caso I), e outro caso em que a área de contato trabalha parcialmente. menor área dos casos II, III, IV e V).

O procedimento utilizado para as Tabelas 3 a 6 é o seguinte:

Para o caso I: Substituindo $P_u, M_{ux}, M_{uy}, h_x, h_y$ na equação (1) e subsequentemente substituindo a equação (1), h_x, h_y, c_1, c_2 e *d* nas equações (5) a (8) e (25).

Para os casos II, III, IV e V: Substituindo $\sigma_{umax}, h_x, h_{x1}, h_y, h_{y1}$ na equação (4) e subsequentemente substituindo a equação (4), $h_x, h_{x1}, h_y, h_{y1}, c_1, c_2$ e *d* nas equações (29) a (32) (caso II), nas equações (33) a (36) (caso IIIA), nas equações (37) a (40) (caso IIIB), em equações (41) a (44) (caso IVA), nas equações (45) a (48) (caso IVB), nas equações (49) a (52) (caso VA), nas equações (53) a (56) (caso VB), nas equações (57) a (60) (caso VC), nas equações (61) a (64) (caso VD) e (26), (65) a (68) conforme o caso .

A Tabela 3 mostra os resultados para c_1 e $c_2 = 0,40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 360$ kN-m e $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². A menor área aparece no caso V para $M_{ux} = 360$ e 720 kN-m, e no caso II para $M_{ux} = 1440$ e 2160 kN-m.

Tabela 3. Dimensionamento completo da sapata para $M_{uy} = 360$ kN-m.

(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	<i>d</i> cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spx} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	6.00	6.00	27	632.43	632.43	391.39	391.39	711.02	65.04	53.95	65.55 (23Ø3/4")	65.04	53.95	65.55 (23Ø3/4")
V		2.72	2.72	22	229.25	229.25	305.04	305.04	698.58	29.25	19.93	31.35 (11Ø3/4")	29.25	19.93	31.35 (11Ø3/4")
I	720	6.00	12.00	27	1351.21	632.43	421.25	391.39	715.51	148.38	53.95	152.10 (30Ø1")	63.43	107.89	111.54 (22Ø1")
V		2.22	4.45	27	472.00	196.31	367.54	298.13	709.58	51.44	19.93	55.77 (11Ø1")	19.61	40.01	42.75 (15Ø3/4")
I	1440	6.00	24.00	32	2790.60	632.43	434.23	384.90	717.41	278.09	63.94	278.85 (55Ø1")	52.71	255.74	258.57 (51Ø1")
II		1.87	7.46	37	948.06	174.75	419.11	254.16	720.00	78.18	23.04	79.80 (16Ø1")	12.56	91.91	94.05 (33Ø3/4")
I	2160	6.00	36.00	42	4230.40	632.43	437.49	371.76	717.76	311.87	83.92	314.34 (62Ø1")	39.96	503.50	507.00 (100Ø1")
II		1.71	10.24	42	1428.46	165.34	447.01	210.14	720.00	109.68	23.02	111.54 (22Ø1")	10.44	143.22	145.35 (51Ø3/4")

A Tabela 3 mostra o seguinte: A superelevação efetiva é governada pela cortante por puncionamento para os dois casos ($M_{ux} = 360, 720$ kN-m), e pelo momento no eixo *a* para os dois casos ($M_{ux} = 1440, 2160$ kN-m). A menor escala efetiva ocorre no caso V para $M_{ux} = 360$ kN-m, a menor escala efetiva ocorre no caso I para $M_{ux} = 1440$ kN-m, e para $M_{ux} = 720, 2160$ kN-m a escala efetiva é a mesma em ambos os casos. A maior área de aço proposta aparece no caso I para os dois casos em ambas as direções.

A Tabela 4 mostra os resultados para c_1 e $c_2 = 0,40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 720$ kN-m e $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². A menor área aparece no caso V para $M_{ux} = 360$ kN-m, e no caso II para $M_{ux} = 720, 1440$ e 2160 kN-m.

Tabela 4. Dimensionamento completo da sapata para $M_{uy} = 720$ kN-m.
(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{smiy} cm ²	A_{spx} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{smix} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	12.00	6.00	27	632.43	1351.21	391.39	421.25	715.51	63.43	107.89	111.54 (22Ø1")	148.38	53.95	152.10 (30Ø1")
V		4.45	2.22	27	196.31	472.00	298.13	367.54	709.58	19.61	40.10	42.75 (15Ø3/4")	51.44	19.96	54.15 (19Ø3/4")
I	720	12.00	12.00	27	1351.21	1351.21	421.25	421.25	717.76	139.46	107.89	141.96 (28Ø1")	139.46	107.89	141.96 (28Ø1")
II		3.73	3.73	27	430.31	430.31	392.78	392.78	720.00	44.47	33.54	45.63 (9Ø1")	44.47	33.54	45.63 (9Ø1")
I	1440	12.00	24.00	27	2790.60	1351.21	435.76	421.25	718.88	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")	135.74	215.78	218.01 (51Ø1")
II		3.22	6.45	27	913.51	408.86	458.25	423.74	720.00	104.20	28.95	106.47 (21Ø3/4")	41.21	57.99	59.85 (21Ø3/4")
I	2160	12.00	36.00	27	4230.40	1351.21	440.54	421.25	719.25	508.33	107.89	512.07 (101Ø1")	134.59	323.68	324.48 (64Ø1")
II		3.00	9.00	32	1404.83	403.75	480.92	433.67	720.00	140.24	31.97	141.96 (28Ø1")	33.85	95.90	96.90 (34Ø3/4")

A Tabela 5 mostra os resultados para c_1 e $c_2 = 0,40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 1440$ kN-m e $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². A menor área aparece no caso II para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ e 2160 kN-m.

Tabela 5. Dimensionamento completo da sapata para $M_{uy} = 1440$ kN-m.
(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{smiy} cm ²	A_{spx} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{smix} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	24.00	6.00	32	632.43	2790.60	384.90	434.23	717.41	52.71	255.74	258.57 (51Ø1")	278.09	63.94	278.85 (55Ø1")
II		7.46	1.87	37	174.75	948.06	254.16	419.11	720.00	12.56	91.91	94.05 (33Ø3/4")	78.18	23.04	79.80 (16Ø1")
I	720	24.00	12.00	27	1351.21	2790.60	421.25	435.76	718.88	135.74	215.78	218.01 (51Ø1")	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")
II		6.45	3.22	27	408.86	913.51	423.74	458.25	720.00	41.21	57.99	59.85 (21Ø3/4")	104.20	28.95	106.47 (21Ø1")
I	1440	24.00	24.00	27	2790.60	2790.60	435.76	435.76	719.44	288.54	215.78	288.99 (57Ø1")	288.54	215.78	288.99 (57Ø1")
II		5.73	5.73	27	899.07	899.07	484.27	484.27	720.00	94.95	51.52	96.33 (19Ø1")	94.95	51.52	96.33 (19Ø1")
I	2160	24.00	36.00	27	4230.40	2790.60	440.54	435.76	719.63	451.51	215.78	456.30 (90Ø1")	283.13	323.68	324.48 (64Ø1")
II		5.41	8.12	32	1399.94	898.75	498.17	495.32	720.00	157.03	48.64	157.17 (31Ø1")	92.67	73.01	94.05 (33Ø3/4")

A Tabela 4 mostra o seguinte: A superelevação efetiva é governada pela cortante de puncionamento para os dois casos ($M_{ux} = 360, 720, 1440$ kN-m) e pelo momento no eixo a para os dois casos ($M_{ux} = 2160$ kN-m). A menor escala efetiva ocorre no caso I para $M_{ux} = 2160$ kN-m, e para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ kN-m a escala efetiva é a mesma em ambos os casos. A maior área de aço proposta aparece no caso I para os dois casos em ambas as direções.

A Tabela 5 mostra o seguinte: A superelevação efetiva é governada pela punção para os dois casos ($M_{ux} = 720, 1440, 2160$ kN-m) e pelo momento no eixo a para os dois casos ($M_{ux} = 360$ kN -m). A menor escala efetiva ocorre no caso I para $M_{ux} = 360$ kN-m, e para $M_{ux} = 720, 1440, 2160$ kN-m a

escala efetiva é a mesma em ambos os casos. A maior área de aço proposta aparece no caso I para os dois casos em ambas as direções.

A Tabela 6 mostra os resultados para c_1 e $c_2 = 0,40$ m, $P_u = 720$ kN, $M_{ux} = 360, 720, 1440, 2160$ kN-m, $M_{uy} = 2160$ kN-m e $\sigma_{umax} = 250$ kN/m². A menor área aparece no caso II para $M_{ux} = 360, 720, 1440$ e 2160 kN-m.

Tabela 6. Dimensionamento completo da sapata para $M_{uy} = 2160$ kN-m.

(Fonte: Elaboração própria)

Caso	M_{ux} kN-m	h_x m	h_y m	d cm	M_{ua} kN-m	M_{ub} kN-m	V_{uc} kN	V_{ue} kN	V_{up} kN	A_{smy} cm ²	A_{sminy} cm ²	A_{spy} cm ²	A_{smx} cm ²	A_{sminx} cm ²	A_{spx} cm ²
I	360	36.00	6.00	42	632.43	4230.40	371.76	437.49	717.76	39.96	503.50	507.00 (100Ø1")	311.87	83.92	314.34 (62Ø1")
II		10.24	1.71	42	165.34	1428.46	210.14	447.01	720.00	10.44	143.22	145.35 (51Ø3/4")	109.68	23.92	111.54 (22Ø1")
I	720	36.00	12.00	27	1351.21	4230.40	421.25	440.54	719.63	134.59	323.68	324.48 (64Ø1")	307.84	107.89	309.27 (61Ø1")
II		9.00	3.00	32	403.75	1404.83	433.67	480.92	720.00	33.85	95.90	96.90 (34Ø3/4")	140.24	31.97	141.96 (28Ø1")
I	1440	36.00	24.00	27	2790.60	4230.40	435.76	440.54	719.44	283.13	323.68	324.48 (64Ø1")	451.51	215.78	456.30 (90Ø1")
II		8.12	5.41	27	898.75	1399.94	495.32	498.17	720.00	92.67	73.01	94.05 (33Ø3/4")	157.03	48.64	157.17 (31Ø1")
I	2160	36.00	36.00	27	4230.40	4230.40	440.54	440.54	719.75	437.69	323.68	441.09 (87Ø1")	437.69	323.68	441.09 (87Ø1")
II		7.73	7.73	32	1396.69	1396.69	498.81	498.81	720.00	149.44	69.50	152.10 (30Ø1")	149.44	69.50	152.10 (30Ø1")

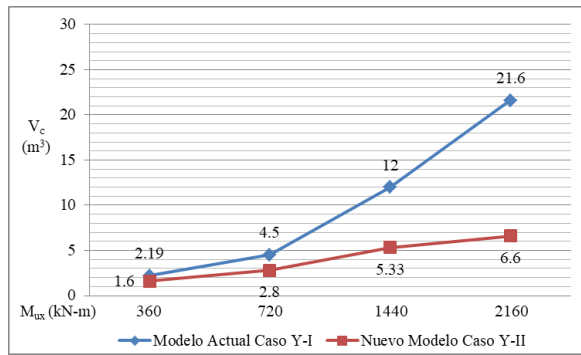
A Tabela 6 mostra o seguinte: A superelevação efetiva é governada pela punção para os dois casos ($M_{ux} = 1440, 2160$ kN-m) e pelo momento no eixo *a* para os dois casos ($M_{ux} = 360, 720$ kN -m). A menor escala efetiva ocorre no caso I para $M_{ux} = 720$ kN-m, e para $M_{ux} = 360, 1440, 2160$ kN-m a escala efetiva é a mesma em ambos os casos. A maior área de aço proposta aparece no caso I para os dois casos em ambas as direções.

A Figura 8 mostra a comparação da flexão uniaxial (carga axial no eixo Y) do modelo atual (Caso I-Y) e do novo modelo (Caso II-Y) em termos de volume de concreto e aço dos exemplos considerados.

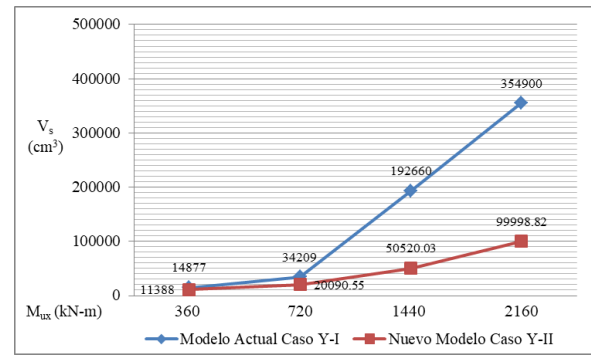
A Figura 8 mostra o seguinte: O novo modelo apresenta volumes de concreto e aço menores em todos os casos do que o modelo atual. A menor diferença nos volumes de concreto e aço ocorre em $M_{ux} = 360$ kN-m de 1,37 vezes para concreto e 1,31 vezes para aço. A maior diferença de volumes de concreto e aço ocorre em $M_{ux} = 2160$ kN-m de 3,27 vezes para concreto e 3,55 vezes para aço.

A Figura 9 mostra a comparação da flexão uniaxial (carga axial no eixo X) do modelo atual (Caso I-X) e do novo modelo (Caso II-X) em termos de volume de concreto e aço dos exemplos considerados.

A Figura 9 mostra o seguinte: O novo modelo apresenta volumes de concreto e aço menores em todos os casos do que o modelo atual. A menor diferença nos volumes de concreto e aço ocorre em $M_{uy} = 360$ kN-m de 1,37 vezes para concreto e 1,31 vezes para aço. A maior diferença de volumes de concreto e aço ocorre em $M_{uy} = 2160$ kN-m de 3,27 vezes para concreto e 3,55 vezes para aço.



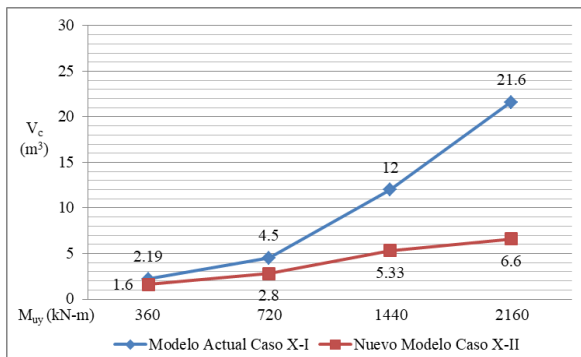
(a) Concreto



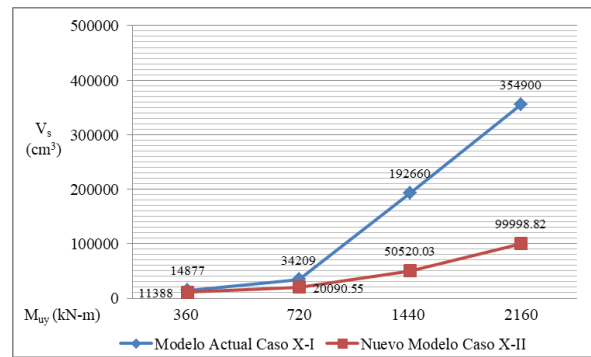
(b) Aço

Figura 8. Comparação para flexão uniaxial ($M_{uy} = 0$)

Fonte: Elaboración própria



(a) Concreto



(b) Acero

Figura 9. Comparação para flexão uniaxial ($M_{ux} = 0$)

Fonte: Elaboración própria

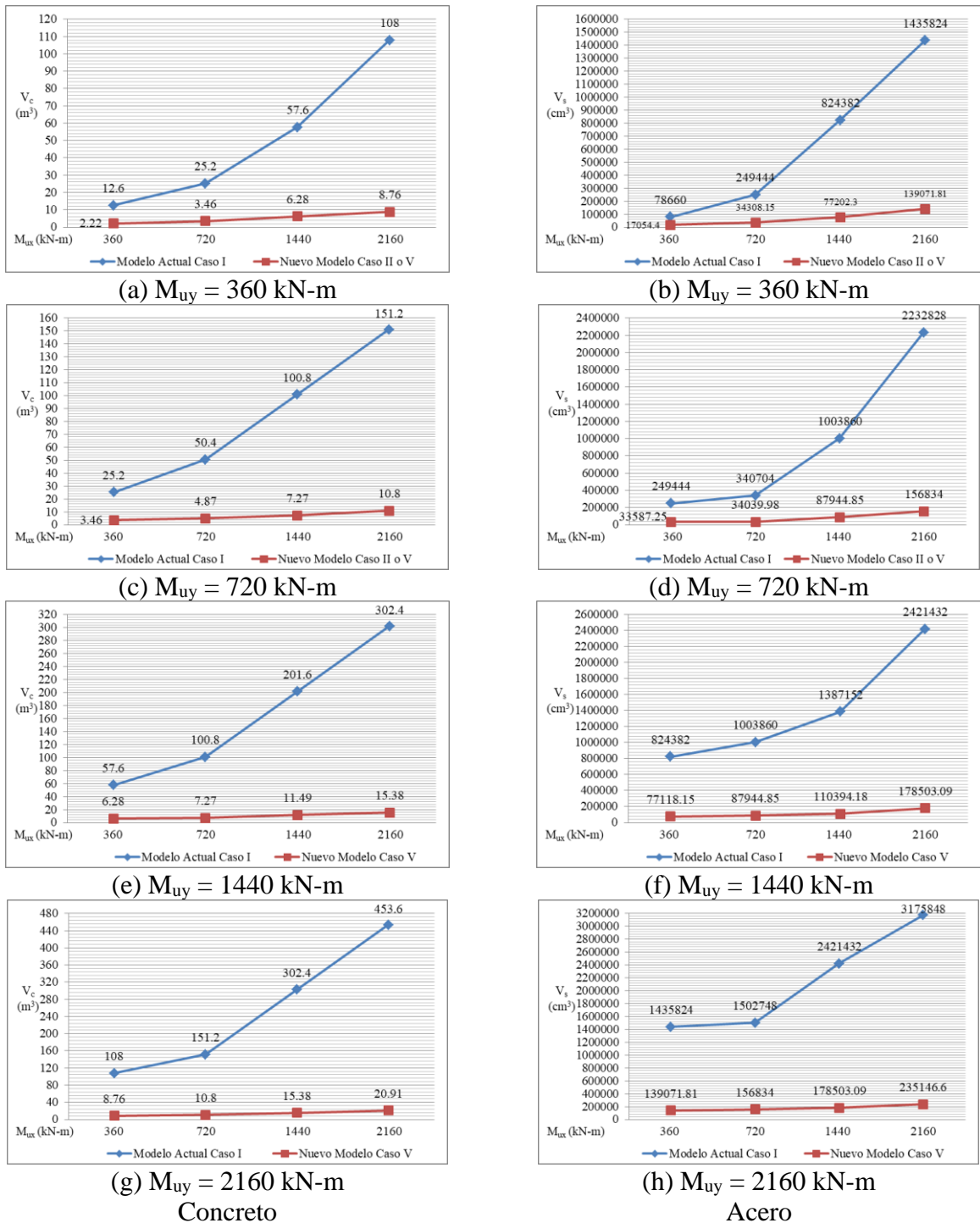
A Figura 10 mostra a comparação da flexão biaxial do modelo atual (Caso I) e do novo modelo (Caso II ou V) em termos de volume de concreto e aço dos exemplos considerados.

A Figura 10 mostra o seguinte:

O novo modelo apresenta volumes menores de concreto e aço em todos os casos do que o modelo atual.

As menores diferenças ocorrem em $M_{ux} = 360$ kN-m para todos os casos nos volumes de concreto e aço de 5,68 vezes para concreto e 4,61 vezes para aço ($M_{uy} = 360$ kN-m), 7,28 vezes para concreto e 7,43 vezes para aço ($M_{uy} = 720$ kN-m), 9,17 vezes para concreto e 10,69 vezes para aço ($M_{uy} = 1440$ kN-m), 12,33 vezes para concreto e 10,32 vezes para aço ($M_{uy} = 2160$ kN-m).

As maiores diferenças ocorrem em $M_{ux} = 2160$ kN-m para todos os casos nos volumes de concreto e aço de 12,33 vezes para concreto e 10,32 vezes para aço ($M_{uy} = 360$ kN-m), 14,00 vezes para concreto e 14,24 vezes para aço ($M_{uy} = 720$ kN-m), 19,66 vezes para concreto e 13,57 vezes para aço ($M_{uy} = 1440$ kN-m), 21,69 vezes para concreto e 13,51 vezes para aço ($M_{uy} = 2160$ kN-m).



Concreto

Acero

Figura 10. Comparação para flexão biaxial

Fonte: Elaboração própria

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um novo modelo matemático de dimensionamento completo para obtenção das espessuras e áreas de aço transversal e longitudinal para sapatas retangulares isoladas submetidas à flexão uniaxial e biaxial apoiadas em solos elásticos, que considera a superfície total trabalhando parcialmente em compressão e assume-se que a distribuição da pressão no solo é linear.

Um novo modelo para o dimensionamento completo de fundações isoladas retangulares levando em consideração que a superfície de contato funciona parcialmente em compressão

As principais contribuições deste trabalho para estes exemplos são:

- 1.- Este trabalho mostra uma redução significativa nos volumes de concreto e aço em relação ao modelo atual, se a superfície de contato com o solo funcionar parcialmente sob compressão.
- 2.- Este trabalho mostra uma redução significativa no volume de escavação em relação ao modelo atual, porque o novo modelo ocupa menos volume.
- 3.- As espessuras para ambos os modelos são regidas por momentos e flexão cortante para flexão uniaxial, e por momentos e punção para flexão biaxial.
- 4.- O novo modelo pode ser utilizado para qualquer norma construtiva, simplesmente tendo em conta os momentos, os esforços de flexão e puncionamento que resistem para definir a sobre-elevação efetiva, e as equações para determinar as áreas de armadura propostas para cada norma construtiva.
- 5.- O novo modelo pode ser usado quando a carga P_u estiver localizada fora do núcleo central ($e_x/h_x + e_y/h_y > 1/6$), e o modelo atual é usado quando a carga P_u estiver localizada dentro do núcleo central ($e_x/h_x + e_y/h_y \leq 1/6$), onde $e_x = M_y/P$ e $e_y = M_x/P$.

Este trabalho mostra uma solução eficaz e robusta aplicada para obter o dimensionamento completo de sapatas retangulares isoladas submetidas à flexão uniaxial e biaxial apoiadas em solos elásticos que trabalham parcialmente em compressão, sendo a variação do diagrama de pressão linear.

Sugestões para trabalhos futuros:

- 1.- Dimensionamento completo para sapatas combinadas (retangular, trapezoidal, cinta, canto e em T) submetidas à flexão uniaxial e biaxial apoiadas em solos elásticos trabalhando parcialmente sob compressão.
- 2.- Sapatas apoiadas em solos totalmente coesos (argilosos) e/ou totalmente granulares (arenosos), o diagrama de pressões é diferente, pois o diagrama de pressões não é linear como apresentado neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- ACI 318S-19 (2019), “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Committee 318”, New York, USA.
- Aguilera-Mancilla, G., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2019), *Modeling for the strap combined footings Part I: Optimal dimensioning*. Steel and Composite Structures. 30(2):97-108. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.2.097>
- Al-Gahtani, H.J. and Adekunle, S.K. (2019), *A boundary-type approach for the computation of vertical stresses in soil due to arbitrarily shaped foundations*. World Journal of Engineering. 16(3): 419-426. <https://doi.org/10.1108/WJE-02-2018-0051>
- Algin, H.M. (2000), *Stresses from linearly distributed pressures over rectangular areas*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 24(8):681-692. [https://doi.org/10.1002/1096-9853\(200007\)24:8<681::AID-NAG89>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1096-9853(200007)24:8<681::AID-NAG89>3.0.CO;2-X)
- Algin, H.M. (2007), *Practical formula for dimensioning a rectangular footing*. Engineering Structures. 29(6):1128-1134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.009>
- Aydogdu, I. (2016), *New Iterative method to Calculate Base Stress of Footings under Biaxial Bending*. Journal of Engineering and Applied Sciences. 8(4):40-48. <https://doi.org/10.24107/ijeas.281460>
- Bezmalinovic Colleoni, A.S. (2016), *Fórmulas analíticas para la presión de contacto lineal en fundaciones rectangulares altamente excéntricas*. IX Chilean Congress on Geotechnical Engineering, Chilean Geotechnical Society, Universidad Austral de Chile.
- Dagdeviren, U. (2016), *Shear stresses below the rectangular foundations subjected to biaxial bending*, Geomechanics Engineering. 10(2):189-205. <https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.2.189>

- Filho, W.L., Carvalho, R.CH., Christoforo, A.L. and Lahr, F.A.R. (2017), *Dimensioning of Isolated Footing Submitted to the under Biaxial Bending Considering the Low Concrete Consumption*. International Journal of Materials Engineering. 7(1):1-11. <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20170701.01.html>
- Galvis, F.A. and Smith-Pardo, J.P. (2020), *Axial load biaxial moment interaction (PMM) diagrams for shallow foundations: Design aids, experimental verification, and examples*. Engineering Structures. 213:110582. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110582>
- Girgin, K. (2017), *Simplified formulations for the determination of rotational spring constants in rigid spread footings resting on tensionless soil*. Journal Civil Engineering and Management. 23(4):464-474. <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1210218>
- Gör, M. (2022), *Analyzing the bearing capacity of shallow foundations on two-layered soil using two novel cosmology-based optimization techniques*. Smart Structures and Systems. 29(3):513-522. <https://doi.org/10.12989/sss.2022.29.3.513>
- Irles-Más, R. and Irles-Más, F. (1992), *Alternativa analítica a la determinación de tensiones bajo zapatas rectangulares con flexión biaxial y despegue parcial*. Informes de la Construcción. 44(419):77-89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2768804>
- Jahanandish, M., Veiskarami, M. and Ghahramani, A. (2012), *Effect of Foundation Size and Roughness on the Bearing Capacity Factor, N_γ , by Stress Level-Based ZEL Method*. Arabian Journal for Science and Engineering. 37(7):1817-1831. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0293-3>
- Kaur, A. and Kumar, A. (2016), *Behavior of eccentrically inclined loaded footing resting on fiber reinforced soil*. Geomechanics Engineering. 10(2):155-174. <https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.2.155>
- Khajehzadeh, M., Taha M.R. and Eslami, M. (2014), *Multi-objective Optimization of foundation using global-local gravitational search algorithm*. Structural Engineering and Mechanics. 50(3): 257-273. <https://doi.org/10.12989/sem.2014.50.3.257>
- Kim-Sánchez, D.S., Luévanos-Rojas, A., Barquero-Cabrero, J.D., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M. and Luévanos-Soto, I. (2022). *A New Model for the Complete Design of Circular Isolated Footings Considering that the Contact Surface Works Partially under Compression*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 18(6):1769-1784. <http://www.ijicic.org/ijicic-180607.pdf>
- Lee, J., Jeong, S. and Lee, J.K. (2015), *3D analytical method for mat foundations considering coupled soil springs*. Geomechanics Engineering. 8(6):845-850. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.6.845>
- Lezgy-Nazargah, M., Mamazizi, A. and Khosravi, H. (2022), *Analysis of shallow footings rested on tensionless foundations using a mixed finite element model*. Structural Engineering and Mechanics. 81(3):379-394. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.81.3.379>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017a), *A mathematical model for dimensioning of square isolated footings using optimization techniques: general case*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 13(1):67-74. <http://www.ijicic.org/ijicic-130105.pdf>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017b), *Optimal dimensioning for the corner combined footings*. Advances in Computational Design. 2(2):169-183. <https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.2.169>
- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A. and Medina-Elizondo, M. (2017c), *A new mathematical model for design of square isolated footings for general case*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 13(4):1149-1168. <http://www.ijicic.org/ijicic-130406.pdf>

- López-Chavarría, S., Luévanos-Rojas, A., Medina-Elizondo, M., Sandoval-Rivas, R. and Velázquez-Santillán, F. (2019), *Optimal design for the reinforced concrete circular isolated footings*. *Advances in Computational Design*. 4(3):273-294. <https://doi.org/10.12989/acd.2019.4.3.273>
- Luévanos-Rojas, A. (2012a), *A Mathematical Model for Dimensioning of Footings Square*. *International Review of Civil Engineering*. 3(4):346-350.
- Luévanos-Rojas, A. (2012b), *A Mathematical Model for the Dimensioning of Circular Footings*. *Far East Journal of Mathematical Sciences*. 71(2): 357-367.
- Luévanos-Rojas, A. (2013), *A Mathematical Model for Dimensioning of Footings Rectangular*. *ICIC Express Letters Part B: Applications*. 4(2):269-274.
- Luévanos-Rojas, A., Faudoa-Herrera, J.G., Andrade-Vallejo, R.A. and Cano-Alvarez, M.A. (2013), *Design of Isolated Footings of Rectangular Form Using a New Model*. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 9(10):4001-4022. <http://www.ijicic.org/ijicic-12-10031.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2014a), *A Comparative Study for Dimensioning of Footings with Respect to the Contact Surface on Soil*. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 10(4):1313-1326. <http://www.ijicic.org/ijicic-13-08003.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2014b), *Design of isolated footings of circular form using a new model*. *Structural Engineering and Mechanics*. 52(4):767-786. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.52.4.767>
- Luévanos-Rojas, A. (2014c), *Design of boundary combined footings of rectangular shape using a new model*. *DYNA Colombia*. 81(188):199-208. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.41800>
- Luévanos-Rojas, A. (2015a), *A New Approach for Dimensioning of Rectangular Footings Using Optimization Techniques*. *ICIC Express Letters Part B: Applications*. 6(11):3141-3146.
- Luévanos-Rojas, A. (2015b), *A New Mathematical Model for Dimensioning of the Boundary Trapezoidal Combined Footings*. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 11(4):1269-1279. <http://www.ijicic.org/ijicic-110411.pdf>
- Luévanos-Rojas, A. (2015c), *A new model for the design of rectangular combined boundary footings with two restricted opposite sides*. *Revista ALCONPAT*. 6(2):172-187. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.137>
- Luévanos-Rojas, A. (2015d), *Design of boundary combined footings of trapezoidal form using a new model*. *Structural Engineering and Mechanics*. 56(5):745-765. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.56.5.745>
- Luévanos-Rojas, A. (2016a), *A Mathematical Model for the Dimensioning of Combined Footings of Rectangular Shape*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*. 39(1):3-9. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/21090/20946>
- Luévanos-Rojas, A. (2016b), *Un nuevo modelo para diseño de zapatas combinadas rectangulares de lindero con dos lados opuestos restringidos*. *Revista ALCONPAT*. 6(2):173-189. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.137>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2017), *Optimal design for rectangular isolated footings using the real soil pressure*. *Ingeniería e Investigación*. 37(2):25-33. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v37n2.61447>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2018a), *A new model for T-shaped combined footings Part I: Optimal dimensioning*. *Geomechanics Engineering*. 14(1):51-60. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.051>
- Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2018b), *A new model for T-shaped combined footings Part II: Mathematical model for design*. *Geomechanics Engineering*. 14(1):61-69. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.1.061>

- Luévanos Rojas, A., López Chavarría, S., Medina Elizondo, M., Sandoval Rivas, R., Fariás Montemayor, O. M. (2020), *Un modelo analítico para el diseño de zapatas combinadas de esquina*. Revista ALCONPAT. 10(3):317-335. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.432>
- Özmen, G. (2011), *Determination of Base Stresses in Rectangular Footings under Biaxial Bending*. Teknik Dergi Digest. 22(4):1519-1535. http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7b559795bd3f63b_ek.pdf?dergi=472
- Rawat, S., Mittal, R.K. and Muthukumar, G. (2020), *Isolated Rectangular Footings under Biaxial Bending: A Critical Appraisal and Simplified Analysis Methodology*. Practice Periodical on Structural Design and Construction. 25(3):04020011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000471](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000471)
- Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013a), *Rigid Spread Footings Resting on Soil Subjected to Axial Load and Biaxial Bending. I: Simplified Analytical Method*. International Journal of Geomechanics. 13(2):109-119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000218)
- Rodriguez-Gutierrez, J.A. and Aristizabal-Ochoa, J.D. (2013b), *Rigid Spread Footings Resting on Soil Subjected to Axial Load and Biaxial Bending. II: Design Aids*. International Journal of Geomechanics. 13(2):120-131. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000210)
- Soto-Garcia, S., Luévanos-Rojas, A., Barquero-Cabrero, J.D., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., Fariás-Montemayor, O.M. and Martínez-Aguilar, C. (2022). *A New Model for the Contact Surface With Soil of Circular Isolated Footings Considering that the Contact Surface Works Partially Under Compression*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 18(4):1103-1116. <http://www.ijicic.org/ijicic-180406.pdf>
- Vela-Moreno, V.B., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M., Sandoval-Rivas, R. and Martínez-Aguilar, C. (2022), *Optimal area for rectangular isolated footings considering that contact surface works partially to compression*. Structural Engineering and Mechanics. 84(4):561-573. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.4.561>
- Velázquez-Santillán, F., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S., Medina-Elizondo, M. and Sandoval-Rivas, R. (2018), *Numerical experimentation for the optimal design for reinforced concrete rectangular combined footings*. Advances in Computational Design. 3(1):49-69. <https://doi.org/10.12989/acd.2018.3.1.049>
- Yáñez-Palafox, J.A., Luévanos-Rojas, A., López-Chavarría, S. and Medina-Elizondo, M. (2019), *Modeling for the strap combined footings Part II: Mathematical model for design*. Steel and Composite Structures. 30(2):109-121. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.2.109>

Análise da correlação entre a condição de pavimentos urbanos e elementos do sistema de drenagem

M. Diniz^{1*}  R. Melo¹ 

* Autor de Contato: mariaingridydiniz@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.604>

Recebido: 09/05/2022 | Correções recebidas: 23/03/2023 | Aceito: 29/03/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

A pesquisa em questão objetivou analisar a correlação entre o índice de condição dos pavimentos e a condição de dois elementos de drenagem superficial: bocas de lobo e sarjetas. O estudo foi realizado a partir da análise de 19 trechos, distribuídos pelo bairro de Tambaú, em João Pessoa-PB. O cálculo para a condição dos pavimentos foi realizado pelo método do PCI e a condição dos elementos de drenagem foi verificada por meio de análise subjetiva. Os resultados da pesquisa mostraram quando os elementos se enquadravam ou não nas condições ideais, e embora os elementos de drenagem sejam considerados no desempenho dos pavimentos, a avaliação estatística apresentou uma correlação fraca entre a condição dos pavimentos e os elementos de drenagem avaliados.

Palavras-chave: sistemas de infraestrutura; estatística; vias urbanas.

Citar como: Diniz, M., Melo, R. (2023), "Análise da correlação entre a condição de pavimentos urbanos e elementos do sistema de drenagem", Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 220 – 234, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.604>

¹ Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor 1 contribuiu com a atividade de revisão de literatura, coleta de dados, redação do trabalho, discussão dos resultados e conclusões, correspondente a 60% do trabalho, o autor 2 contribuiu com a atividade da ideia original, revisão do trabalho final, opiniões nas discussões, correspondente a 40%.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Analysis of the drainage system between the condition of urban pavements and drainage elements

ABSTRACT

The research in question aimed to analyze the correlation between the pavement condition index and the condition of two surface drainage elements: storm drains and gutters. The study was carried out from the analysis of 19 stretches, distributed by the neighborhood of Tambaú, in João Pessoa-PB. The calculation for the condition of the pavements was performed by the PCI method and the condition of the drainage elements was verified by means of subjective analysis. The research results showed when the elements fit or not in the ideal conditions, and although the drainage elements are considered in the pavement performance, the statistical evaluation showed a weak correlation between the pavement condition and the evaluated drainage elements.

Keywords: infrastructure systems; statistic; urban roads.

Análisis de la correlación entre el estado de los pavimentos urbanos y los elementos del sistema de drenaje

RESUMEN

La investigación en cuestión tuvo como objetivo analizar la correlación entre el índice de condición del pavimento y la condición de dos elementos de drenaje superficial: desagües pluviales y cunetas. El estudio fue realizado a partir del análisis de 19 tramos, distribuidos por el barrio de Tambaú, en João Pessoa-PB. El cálculo del estado de los pavimentos se realizó por el método PCI y el estado de los elementos de drenaje se verificó mediante análisis subjetivo. Los resultados de la investigación mostraron cuando los elementos encajan o no en las condiciones ideales, y aunque los elementos de drenaje son considerados en el desempeño del pavimento, la evaluación estadística mostró una débil correlación entre la condición del pavimento y los elementos de drenaje evaluados.

Palabras clave: sistemas de infraestructura; estadística; caminos urbanos.

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

Considerado como o principal modal de transporte, as rodovias apresentam grande importância no desenvolvimento do país (PIRES E MENDES, 2021), e para que as vias cumpram com a sua função de maneira adequada é necessário que estas apresentem um estado de conservação apropriado.

Um pavimento com uma estrutura que não apresenta desempenho adequado pode ocasionar consequências indesejadas. Nessa perspectiva, a drenagem de uma estrada auxilia na sua conservação, além de prevenir acidentes nas vias. Logo, um dos principais objetivos da drenagem das rodovias é proteger a infraestrutura da ação negativa das águas, como por exemplo a redução da estrutura do piso e o rompimento dos aterros (LIMA et al., 2022).

De acordo com Pinheiro, Coutinho e Ferreira (2021), o sistema de drenagem é um elemento essencial no que diz respeito ao desempenho de grande parte dos elementos que compõem uma via urbana. Ainda segundo o autor, a condução correta da água é a principal função do sistema de drenagem, sendo capaz de conservar as características das camadas de projeto do pavimento, como a base, a sub-base e o subleito, além de garantir maior durabilidade da estrada, além de evitar o acúmulo de água na superfície.

Uma maneira de certificar que o sistema de drenagem funcione corretamente é verificando o bom estado de conservação dos elementos que o compõem. Além da estrutura, a limpeza e a manutenção dos elementos também são essenciais para que o sistema cumpra com as suas funções de projeto.

Diante disso, o trabalho em questão se propôs a avaliar a correlação entre a condição dos pavimentos selecionados e a condição de dois elementos de drenagem superficial dos trechos: bocas de lobo e sarjetas. A partir da correlação, pretende-se averiguar até que ponto existe influência do estado de conservação dos elementos de drenagem na condição dos pavimentos. Por fim, os responsáveis pelo gerenciamento dos sistemas de infraestrutura podem utilizar as métricas apresentadas como auxílio para a manutenção e recuperação das estruturas avaliadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentos

Os pavimentos rodoviários apresentam grande relevância no que se refere ao desenvolvimento de um país no auxílio da realização de serviços básicos, como o transporte de mercadorias e a locomoção da população. Diante da sua importância, é necessário que as vias se apresentem em um bom estado de conservação para que assim possam oferecer seus serviços de maneira adequada e segura para os usuários (LIMA et al., 2022).

Uma maneira de verificar se os pavimentos estão em um estado aceitável de conservação é calculando o seu índice de condição. Uma dessas avaliações pode ser feita a partir do Paviment Condition Index (PCI), desenvolvido pela United States Army Corps of Engineers (USACE) em 1976. Inicialmente desenvolvido apenas para a avaliação de pavimentos aeroportuários, e posteriormente em 1979 adaptada para uma versão específica para avaliação de pavimentos rodoviários e urbanos.

De acordo com a norma ASTM D6433-2018 - Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, é necessário selecionar uma amostra de tamanho $225 \text{ m}^2 \pm 90\text{m}^2$. A avaliação consiste em realizar o levantamento de defeitos, além da quantidade e severidade de cada um deles. A Tabela 1 apresenta os tipos de defeitos que devem ser levantados durante a aplicação do método.

Tabela 1. Defeitos de pavimento asfáltico e unidade de medida para o Método do PCI

Defeito	Forma de Medição	Defeito	Forma de Medição
Couro de Crocodilo	Área	Remendos	Área
Exsudação	Área	Agregado Polido	Área
Fissura em blocos	Área	Panelas	Unidade
Elevações/recalques	Metro Linear	Cruzamento ferroviário	Área
Corrugação	Área	Afundamento de trilha de roda	Área
Afundamento localizado	Área	Escorregamento de massa	Área
Fissura de borda	Metro Linear	Fissuras devido ao escorregamento de massas	Área
Fissuras por reflexão de juntas	Metro Linear	Inchamento	Área
Desnível entre Pavimento e o acostamento	Metro Linear	Desgaste	Área
Fissura longitudinal e transversal	Metro Linear	-	-

Fonte: ASTM (2018) - Adaptado

Para que se possa calcular o índice de condição do pavimento, é necessário obter os Valores de Dedução (VD) de acordo com o tipo, severidade e extensão do defeito, que representa a influência que o mesmo apresenta sobre a condição do pavimento, variando entre 0 e 100, em que 0 o defeito não impacta na condição do pavimento e 100, o defeito possui máxima interferência prejudicial. Os valores dos VD são obtidos com o auxílio de ábacos disponíveis na ASTM D6433-2018. Somando-se os VD é possível obter o Valor Total de Dedução (VTD) para os pavimentos analisados com o auxílio da equação 1.

$$VTD = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{mi} a(T_j, S_i, D_{ij}) \times F(t, q) \quad (1)$$

Em que:

$a(T_j, S_i, D_{ij})$: função de perda de capacidade para servir ao tráfego, cujas variáveis independentes são o tipo:

T_j : tipos de defeitos;

S_i : níveis de severidade;

D_{ij} : densidades de defeitos;

i : contador dos tipos de defeitos;

j : contador dos níveis de severidade;

p : número total de tipos de defeitos;

mi : número do nível de severidade para o i -ésimo tipo de defeito;

$F(t, q)$: fator de ajuste para reduzir o efeito do excesso de tipos de defeitos. (t) depende do número de funções (a) , e (q) é o número de valores numéricos de funções (a) maiores que 5.

De posse do VTD, é necessário corrigi-lo em função da quantidade de defeitos presentes em cada trecho, de acordo com o ábaco 20 da mesma norma. Logo, é possível encontrar o Valor da Dedução Corrigido (VDC) e, portanto, o valor do PCI resultante da Equação 2.

$$PCI = 100 - VDC \quad (2)$$

A partir do valor obtido para o PCI no trecho analisado, o pavimento é classificado de acordo com a Tabela 2, variando o seu valor de 0 (condição péssimo) a 100 (condição excelente).

Tabela 2. Classificação do PCI

Classificação	Valor do PCI
Excelente	86 – 100
Muito Bom	71 -85
Bom	56 – 70
Médio	41 – 55
Ruim	26 – 40
Muito Ruim	11 - 25
Péssimo	0 - 10

Fonte: Shahin (2005)

2.2 Drenagem dos Pavimentos Urbanos

De acordo com Corrêa e Dutra (2018), o sistema de drenagem pode ser entendido como o conjunto de elementos que objetivam garantir a integridade das estradas e os seus arredores, além de promover segurança aos usuários. Tais dispositivos direcionam a água para um local adequado, sendo devidamente planejado durante a construção ou restauração de uma via (REIS, 2016).

Ao se referir ao sistema de drenagem urbana é necessário entender a sua subdivisão em macro drenagem e microdrenagem (RESPLANDES et al., 2021). De acordo com o Departamento de Engenharia Sanitária da Universidade de São Paulo (2015), a macrodrenagem pode ser definida como um curso que direciona um elevado volume de água, como rios e córregos. Já no caso da microdrenagem, pode ser considerada como a parte do sistema responsável pelo direcionamento de águas pluviais até o sistema macro. Esta é composta por elementos tais como as sarjetas, bocas de lobo, bueiros, poços de visita e galerias.

No caso dos pavimentos urbanos de uma via, é indispensável a existência de um sistema de microdrenagem para o direcionamento das águas pluviais uma vez que é necessário manter tal infraestrutura essencial nas condições ideais de funcionamento (SOUZA, 2012).

No que se refere ao acúmulo de águas, sejam superficiais ou as águas subterrâneas, pode ser um fator prejudicial às rodovias. De acordo com Lima et al. (2022), o acúmulo de água na pista de rolamento pode prejudicar severamente as condições de aderência da pista, podendo provocar acidentes.

No caso de inundações, também é possível observar prejuízos significativos aos pavimentos e conseqüentemente, à população. Além da alteração no tráfego com a visível redução na segurança, a água é capaz de infiltrar nas camadas do pavimento diminuindo a sua vida útil. A água que permanece contida nas camadas, além daquela proveniente do lençol freático, podem provocar danos como redução da capacidade de suporte da camada de subleito, além de afundamentos e até a ruptura (REIS, 2016).

3. MÉTODO DE TRABALHO

Com o intuito de cumprir com o objetivo proposto pela pesquisa, a seguinte sequência de atividades foi desenvolvida:

- i) delimitação da área de estudo;
- ii) elaboração dos formulários para coleta de dados;
- iii) levantamento de dados sobre a condição dos pavimentos;
- iv) levantamento de dados sobre a condição dos elementos de drenagem;
- v) análise da correlação entre os resultados encontrados.

Os trechos avaliados são objeto de estudo dos alunos de graduação e pós-graduação da Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Devido a disponibilidade de banco de dados sobre os trechos em questão (item 3.1) e por ser considerado um bairro turístico na cidade em que a qualidade das vias precisa se apresentar em condições ideais, resolveu-se avaliar a correlação entre as informações.

Em relação aos pavimentos, o levantamento de defeitos foi feito por análise de imagens disponível no banco de dados utilizado, com a utilização da ficha disponível na NBR 006/2003 – PRO. Para auxiliar a etapa de quantificação dos defeitos, concomitante a medição, um registro fotográfico foi feito para cada defeito para que se pudesse avaliar a severidade dos mesmos, auxiliando na posterior utilização dos ábacos do apêndice X3 da Norma ASTM D6433 – 18, durante a etapa de qualificação.

Para a obtenção de dados em relação ao sistema de drenagem urbana superficial foi realizado um levantamento dos elementos quem compunham a rede, adaptadas do estudo de Novaes et. al. (2019), a partir de um preenchimento dos formulários elaborados de modo a quantificar a existência de bocas de lobo e sarjetas, assim como a qualificação de suas respectivas condições de conservação, podendo estas serem boas, regulares ou péssimas.

3.1 Caracterização dos Trechos

Os trechos avaliados se apresentavam distribuídos pelo bairro de Tambaú, da cidade de João Pessoa – PB. Foram escolhidas vias que possuíssem concomitantemente a pavimentação do tipo flexível e sistema de drenagem superficial. A localização dos trechos é apresentada na Figura 1.

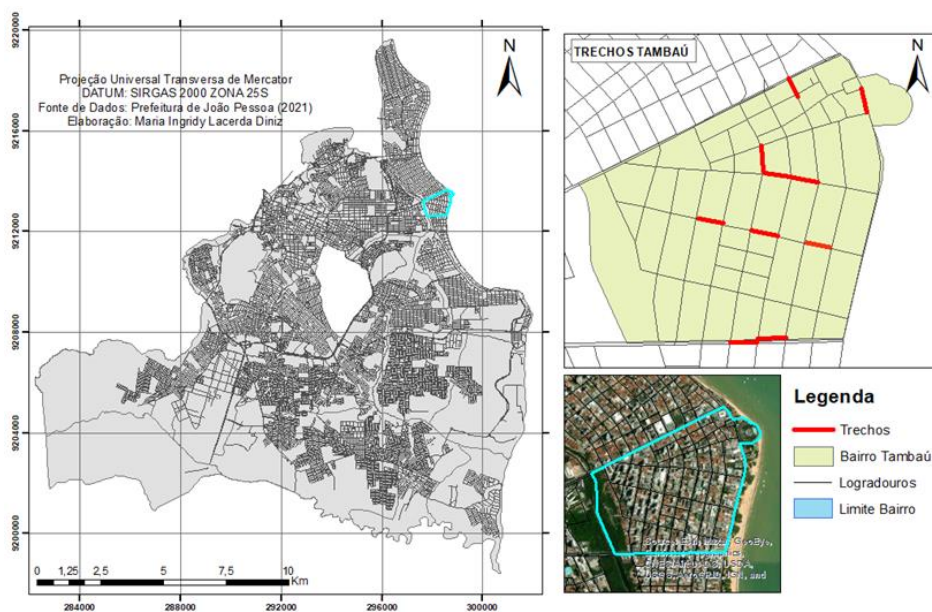


Figura 1. Localização da Área e Trechos de Estudo

As informações detalhadas acerca das localizações de cada trecho se encontram na Tabela 3. Com o intuito de manter a proporcionalidade das amostras, todas possuíam a mesma extensão de 80 metros.

Tabela 3. Informações sobre os Trechos

Trecho	Faixa	Rua	Sentido	Limites		Extensão (m)
				Início	Final	
1	Esquerda	Rua Nossa Sra dos Navegantes	Tambaú - Manaíra	Espaço luz do ser	Mercado de Artesanato- Av Ruy Carneiro	80
2	Direita	Rua Nossa Sra dos Navegantes	Tambaú - Manaíra	Espaço luz do ser	Mercado de Artesanato - Av Ruy Carneiro	
3	Esquerda	Av. Nego	Praia	R Infante Dom Henrique	Av. Profa Maria Sales	
4	Direita	Av. Nego	Praia	R Infante Dom Henrique	Av. Profa Maria Sales	
5	Esquerda	Av. Nego	Praia	Av. Profa Maria Sales	Rua N. Sra dos Navegantes	
6	Direita	Av. Nego	Praia	Av. Profa Maria Sales	Rua N. Sra dos Navegantes	
7	Esquerda	Rua Infante Dom Henrique	Tambaú - Manaíra	Av Nego	Av. Olinda	
8	Direita	Rua Infante Dom Henrique	Tambaú - Manaíra	Av Nego	Av. Olinda	
9	Esquerda	Rua Helena Meira Lima	Centro	Av. Profa Maria Sales	Rua Infante Dom Henrique	
10	Direita	Rua Helena Meira Lima	Centro	Av. Profa Maria Sales	Rua Infante Dom Henrique	
11	Esquerda	Rua Helena Meira Lima	Centro	Rua Monteiro Lobato	Rua Silvino Lopes	
12	Direita	Rua Helena Meira Lima	Centro	Rua Monteiro Lobato	Antes da faixa de Pedestre com a Rua Silvino Lopes	
13	Esquerda	Rua Helena Meira Lima	Centro	Av. Antônio Lira	Rua Nossa Sra dos Navegantes	
14	Direita	Rua Helena Meira Lima	Centro	Av. Antônio Lira	Rua Nossa Sra dos Navegantes	
15	Esquerda	Rua Pres. Epitácio Pessoa	Bessa	Rua Nossa Sra dos Navegantes	Av. Profa Maria Sales	
16	Direita	Rua Pres. Epitácio Pessoa	Bessa	Rua Nossa Sra dos Navegantes	Av. Profa Maria Sales	
17	Esquerda	Rua Pres. Epitácio Pessoa	Bessa	Av. Manoel Cavalcante de Sousa	Av. Profa Maria Sales	
18	Direita	Rua Pres. Epitácio Pessoa	Bessa	Av. Manoel Cavalcante de Sousa	Av. Profa Maria Sales	
19	Direita	Av. Alm. Tamandaré	Bessa	Av. Olinda	Praça Sto Antônio	

3.2 Análise Estatística

Pode-se averiguar a existência da relação, assim como a intensidade, existente entre duas variáveis a partir da análise de sua correlação. Para isso, foi utilizado o coeficiente de Correlação de Pearson (r) apresentado pela equação 3 (MERGH, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]}} \quad (3)$$

Em que:

n: número de pares de observações;

X_i: observação i da variável X;

Y_i: observação i da variável Y;

\bar{X} : média dos valores de X;

\bar{Y} : média dos valores de Y.

De acordo com Francisco & Dantas Neto (2021), é possível adotar intervalos para auxiliar na interpretação dos resultados de r, como apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Interpretação dos Valores do Coeficiente de Correlação (r)

Coeficientes de Correlações de Pearson (r)	Tipos de Correlações
r = 1	Perfeita Positiva
0,8 ≤ r < 1	Forte Positiva
0,5 ≤ r < 0,8	Moderada Positiva
0,1 ≤ r < 0,5	Fraca Positiva
0 < r < 0,1	Íntima Positiva
0	Nula
0,1 < r < 0	Íntima Negativa
-0,5 < r ≤ -0,1	Fraca Negativa
-0,8 < r ≤ -0,5	Moderada Negativa
-1 < r ≤ -0,8	Forte Negativa
r = -1	Perfeita Negativa

Fonte: Francisco & Dantas Neto (2021) Adaptado

Para a análise em questão, o valor do PCI, devido a sua metodologia de cálculo apresentar maior precisão da real quantificação do estado de condição do elemento avaliado (pavimento), será considerado com variável independente (X). As variáveis dependentes serão, portanto, as bocas de lobo (Y₁) e as sarjetas (Y₂).

Para auxiliar na análise estatística, foi realizado o teste estatístico de hipótese para averiguar a diferença entre as médias obtidas. Neste caso, serão determinadas as seguintes hipóteses:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (4)$$

$$H_A: \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (5)$$

Em que:

H₀: Hipótese nula;

H_A: Hipótese alternativa;

μ₁ e μ₂: Médias das populações 1 e 2, respectivamente (Sendo a população relacionadas aos

pavimentos e a população 2 cada um dos elementos de drenagem por vez).

Nesse estudo, o caso considerado foi o de dados não emparelhados, com os desvios-padrão das populações conhecidos, resultando em duas comparações de médias. O procedimento consiste em fazer teste da média das diferenças das populações, adotando-se a ordem de 0,5 baseado no estudo de Medeiros *et al.* (2017). Logo, a análise verifica a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu_d = 0,5 \quad (6)$$

$$H_A: \mu_d > 0,5 \quad (7)$$

Em que:

μ_d : Diferença das médias entre as populações

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condição dos Pavimentos

O levantamento dos defeitos encontrados nos pavimentos se encontra na Tabela 5. Os defeitos de trinca em bloco, elevação e recalque, corrugação, fissura por reflexão de junta, desnível pavimento/acostamento, cruzamento ferroviário, escorregamento de massa, fissura devido a escorregamento e inchamento não foram encontrados durante o levantamento, e devido a isso, não há quantificação dos defeitos supracitados na Tabela 5.

Tabela 5. Quantificação dos Defeitos dos Pavimentos

Tr.	TF	E	AL	TB	TLV	R	AP	P	TR	D
	Área [m ²]	Área [m ²]	Área [m ²]	Metro Linear	Metro Linear	Área [m ²]	Área [m ²]	Unid.	Área [m ²]	Área [m ²]
1	-	-	-	12	143	5	-	-	-	50
2	88	-	-	-	90	2	-	-	15	200
3	59	-	0,5	42	46		-	1	-	210
4	79	-		38,7	42	11,25	-	-	-	220
5	-	-	-	-	43	4,25	-	-	-	38
6	-	-	-	-	21		-	1	-	2 6
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
8	-	-	-	-	35	-	-	-	-	13
9	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	46
10	-	-	-	-	-	4,5	-	-	-	61
11	-	-	-	-	-	2	-	-	-	9
12	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	19
13	-	-	-	-	-	1	6	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36
15	-	-	-	-	49	-	-	-	-	73
16	32	-	-	-	-	-	2	-	-	54
17	-	-	-	-	6	-	-	-	-	80
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15

*Legenda: TLV: Trinca Longitudinal e Transversal, TF: Trinca por Fadiga, E: Exsudação, AL: Afundamento Localizado, TB: Trinca em borda, R: Remendo, AP: Agregado Polido, P: Panela, TR: Trilha de Roda, D: Desgaste.

A partir da avaliação do levantamento de defeitos dos trechos foi possível destacar que o defeito com maior registro foi o desgaste, apresentando-se em quase que todas locais avaliados, com exceção do Trecho 13.

Grande quantidade das trincas apresentadas pode ter sido ocasionada em função da reflexão das trincas da base de paralelepípedos. É importante destacar que não foi possível adquirir a informação com a Prefeitura sobre quais pavimentos flexíveis avaliados possuíam ou não esse tipo de base em paralelos. A observação desse fator só era possível quando a base se encontrava exposta devido a algum defeito no pavimento.

De acordo com o Bernucci *et al.* (2008), essas trincas também podem ser ocasionadas por demais como a ação da repetitivas das cargas do tráfego, a ação climática (gradientes térmicos), o possível envelhecimento do ligante e perda de flexibilidade, compactação ineficiente do revestimento, deficiência no teor de ligante asfáltico, subdimensionamento, recalques diferenciais entre outros.

Após a ponderação da área afetada como determinada pela ASTM D6433/2018, foi possível calcular a condição dos pavimentos a partir do PCI. Os valores do índice para cada trecho, bem como a respectiva classificação, se encontram na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação da Condição dos Pavimentos pelo método do PCI

Trecho	PCI	Classificação
1	56	Bom
2	20	Muito Ruim
3	37	Ruim
4	50	Médio
5	81	Muito Ruim
6	74	Muito Bom
7	98	Excelente
8	88	Excelente
9	92	Excelente
10	89	Excelente
11	94	Excelente
12	95	Excelente
13	99	Excelente
14	94	Excelente
15	62	Bom
16	64	Bom
17	83	Muito Bom
18	80	Muito Bom
19	85	Muito Bom

4.2 Condição dos Elementos de Drenagem

Foram observadas a existência e as condições dos elementos de drenagem (bocas de logo e sarjetas), nos trechos avaliados. As informações acerca dos elementos se encontram na Tabela 7. A ausência de ambos os elementos foi encontrada nos trechos 15 e 17. Nota-se a presença concomitante dos elementos na maior parte dos trechos avaliados, com exceção do trecho 4, que não apresentava bocas de lobo na sua extensão, porém contava com a presença de sarjeta.

Tabela 7. Quantificação e Qualificação dos Elementos de Drenagem

Trecho	Quantificação dos Elementos		Qualificação dos Elementos					
			Boca de lobo			Sarjeta		
	Boca de Lobo	Sarjeta	Bom	Regular	Péssimo	Bom	Regular	Péssimo
1	3	sim	x	-	-	-	-	x
2	2	sim	-	x	-	-	x	-
3	1	sim	x	-	-	-	x	-
4	0	sim	-	-	-	-	x	-
5	1	sim	x	-	-	-	x	-
6	1	sim	x	-	-	-	x	-
7	2	sim	-	-	x	-	x	-
8	2	sim	--	x	-	-	x	-
9	1	sim	x	-	-	x	-	-
10	1	sim	x	-	-	x	-	-
11	1	sim	x	-	-	x	-	-
12	1	sim	x	-	-	x	-	-
13	1	sim	-	x	-	x	-	-
14	1	sim	x	-	-	x	-	-
15	0	não	-	-	-	-	-	-
16	1	sim	x	-	-	-	x	-
17	0	não	-	-	-	-	-	-
18	1	sim	-	-	x	-	x	-
19	1	sim	x	-	-	-	x	-

De acordo com a tabela 7, os trechos 1, 2, 7 e 8 apresentavam mais de uma boca de lobo para serem avaliadas. Neste caso, apenas uma marcação foi feita na coluna de qualificação dos elementos, já que todas as bocas de lobo de um mesmo trecho apresentavam a mesma condição, como por exemplo os trechos 2 e 8, que possuíam duas bocas de lobo cada, e ambas as peças se apresentaram em estado regular.

Foi possível verificar que a maioria das bocas de lobo dos trechos, somando um total de 57,9%, se enquadravam na categoria de bom estado de conservação.

Em relação a condição das sarjetas, apenas o trecho 1 apresentou as condições Péssimas. Logo, mesmo que o trecho tenha apresentado 3 bocas de lobo, a condição da sarjeta possivelmente impede o direcionamento da água para as mesmas, o que interfere no funcionamento do sistema. Já os demais trechos apresentavam as sarjetas em condições regulares (52,6%) ou boas (31,6%).

4.3 Correlação entre a Condição dos Pavimentos e Elementos de Drenagem

A tabela 8 apresenta a comparação entre os índices encontrados para a condição de cada elemento avaliado. Para permitir a comparação entre os dados, adaptado de Silva, Diniz e Melo (2020), os valores de PCI foram divididos por 25 (vinte e cinco) e convertidos para a mesma escala da condição das sarjetas e bocas de lobo, ou seja, valores entre 0 e 4.

Tabela 8. Comparação entre os índices de condição dos elementos avaliados

Trecho	Valores			Classificação da Condição		
	PCI (Pavimentos)	Bocas de lobo	Sarjeta	PCI (Pavimentos)	Bocas de lobo	Sarjeta
1	2,24	3	1	Bom	Bom	Péssimo
2	0,8	2	2	Muito Ruim	Regular	Regular
3	1,48	3	2	Ruim	Bom	Regular
4	2	0	2	Médio	Não Existe	Regular
5	3,24	3	2	Muito Ruim	Bom	Regular
6	2,96	3	2	Muito Bom	Bom	Regular
7	3,92	1	2	Excelente	Péssimo	Regular
8	3,52	2	2	Excelente	Regular	Regular
9	3,68	3	3	Excelente	Bom	Bom
10	3,56	3	3	Excelente	Bom	Bom
11	3,76	3	3	Excelente	Bom	Bom
12	3,8	3	3	Excelente	Bom	Bom
13	3,96	2	3	Excelente	Regular	Bom
14	3,76	3	3	Excelente	Bom	Bom
15	2,48	0	0	Bom	Não Existe	Não Existe
16	2,56	3	2	Bom	Bom	Regular
17	3,32	0	0	Muito Bom	Não Existe	Não Existe
18	3,2	1	2	Muito Bom	Péssimo	Regular
19	3,4	3	2	Muito Bom	Bom	Regular

A partir da tabela 5, observa-se que em 5 trechos (9, 10, 11, 12 e 14) a condição de todos os elementos avaliados foi máxima, sendo “excelente” para os pavimentos e “bom” para as bocas de lobo e sarjetas. No entanto, mesmo que a melhor avaliação de pavimentos também tenha sido alcançada nos trechos 7, 8 e 13, a condição dos elementos de drenagem não atingiram a mesma classificação, variando entre “regular” e “péssimo”.

É preciso destacar a situação apresentada pelos trechos 15 e 17, que, mesmo com nenhum dos elementos de drenagem avaliados na pesquisa presente nas vias, o pavimento se apresentou em condições aceitáveis para os usuários, com a segunda melhor classificação na escala previamente apresentada na Tabela 2. Esse resultado entra em conflito com o senso em que se sugere que para um bom funcionamento das vias é necessário o direcionamento adequado da água presente na superfície dos pavimentos.

A tabela 9 apresenta os valores de média, desvio padrão e variância dos resultados encontrados para cada elemento avaliado. O desvio padrão foi considerado do tipo amostral (n-1).

Tabela 9. Média e Desvio Padrão dos Índices de Condição dos Elementos

Elemento	Média (μ)	Desvio Padrão Amostral (σ)	Variância (σ^2)
Pavimentos (PCI)	3,03	0,89	0,79
Bocas de Lobo	2,16	1,17	1,37
Sarjetas	2,05	0,91	0,82

É possível observar que para os três elementos avaliados (Tabela 9), o desvio padrão se apresentou elevado, indicando elevada dispersão entre os valores coletados em campo.

Também foi feita a comparação entre os elementos a partir da diferença entre as médias dos resultados de cada avaliação para verificar a hipótese nula previamente determinada apresentada na Tabela 10.

Tabela 10. Diferença das Médias e Análise da Hipótese Nula

Análise	Diferença das Médias (μ_d)	Hipótese Nula (H_0)
Pavimentos x Bocas de Lobo	0,88	Rejeita-se
Pavimentos x Sarjetas	0,98	Rejeita-se

É possível verificar na Tabela 10 a rejeição da hipótese nula em ambas as análises realizadas, já que a diferença entre os elementos avaliados se apresentou acima de 0,5. Logo, os valores encontrados não podem ser considerados aceitáveis para a correlação entre os elementos.

Ainda com o intuito de avaliar o nível de correlação, foi realizada a análise separadamente para cada elemento de drenagem combinadas com índice de condição de pavimentos, ou seja, foi verificada a correlação entre a condição dos pavimentos e das bocas de lobo e, em seguida, a correlação entre os pavimentos e das sarjetas. Os resultados encontrados se apresentam na Tabela 11.

Tabela 11. Coeficientes de Correlação e de Determinação de Pearson

Combinação	Coeficiente de Correlação (r)	Coeficiente de Determinação (r^2)
Pavimentos x Bocas de Lobo	0,14	0,02
Pavimentos x Sarjetas	0,39	0,15

A partir da Tabela 11 é possível verificar que ambas as correlações se apresentaram dentro do intervalo de $0,1 \leq r \leq 0,5$, sendo assim consideradas como fracas e positivas. No entanto, é necessário destacar que a comparação com a interpretação de Francisco e Dantas Neto (2021) é considerada arbitrária, já que os valores não levam em consideração o contexto do estudo.

Embora os resultados não apresentem comportamento claro de uma equação de 3º grau, na tentativa de melhorar o valor de r^2 , foi realizada uma regressão polinomial de grau 3 para ambas as análises. A partir da Figura 2 é possível observar a dispersão entre a condição dos pavimentos relacionado à condição das bocas de lobo (Figura 2-A) e sarjetas (Figura 2-B), respectivamente.

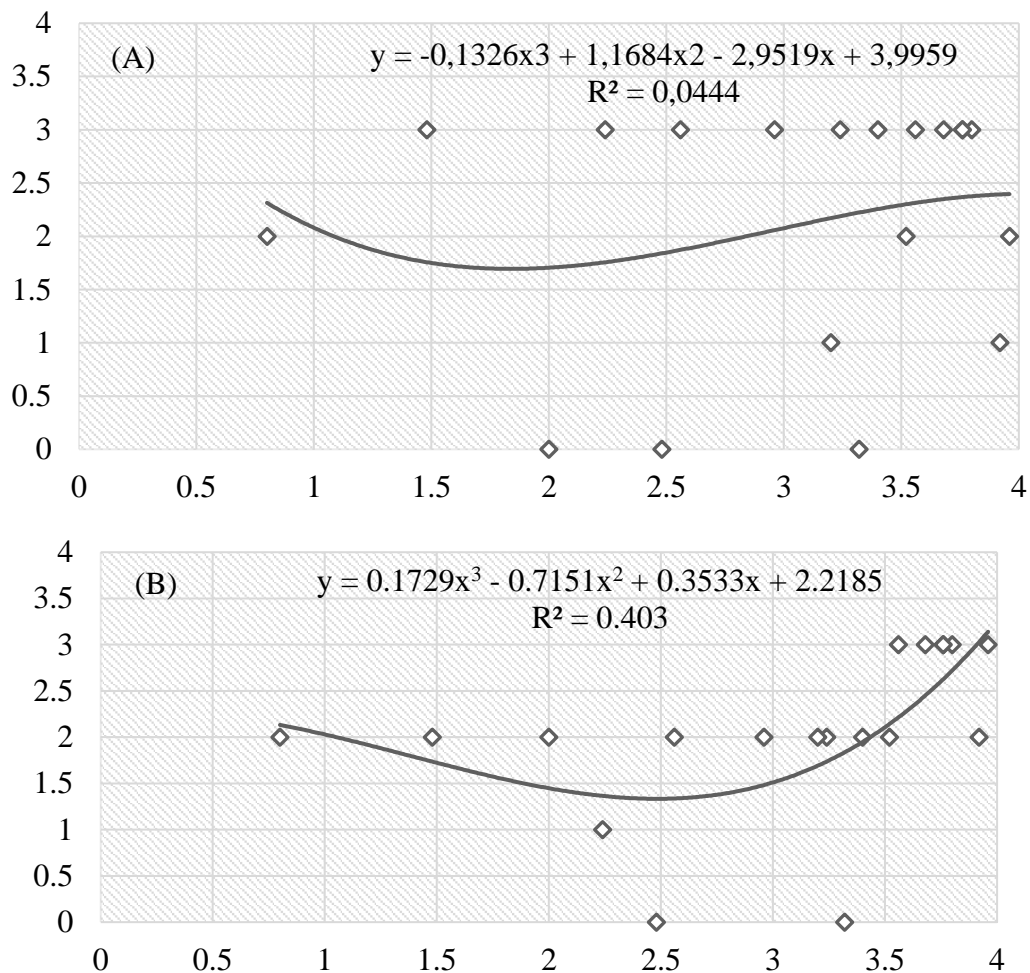


Figura 2. Regressão Polinomial: A) Pavimentos x Bocas de lobo, B) Pavimentos x Sarjetas

A partir da análise dos resultados é possível verificar que para a primeira verificação (Figura 2-A) a dispersão dos dados se apresenta com acurácia baixa, em que a tentativa de ajuste polinomial da curva não se mostrou adequado, apresentando o valor de $r^2 < 0,1$, considerado baixo. Já no segundo caso (Figura 2-B), os resultados apresentaram melhor acurácia quando comparados com a primeira análise. No caso do ajuste da curva, o resultado apresentou comportamento medianamente satisfatório, alcançando um $r^2 = 0,4$.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do levantamento bibliográfico os elementos de drenagem se apresentaram como critérios primordiais para o bom desempenho dos pavimentos, e, embora a avaliação estatística tenha apresentado uma correlação fraca entre a condição dos pavimentos e os elementos de drenagem avaliados, é necessário destacar o nível de complexidade dos elementos das vias urbanas, como por exemplo a presença de demais sistemas de infraestrutura (distribuição de água, coleta de esgoto, energia, gás, etc) que podem influenciar na condição dos pavimentos, além de demais elementos como classificação da via quanto a utilização, frequência de manutenção corretiva, existência de manutenção preventiva, dentre outros.

Com relação à condição da infraestrutura analisada, os dados coletados e avaliados apresentam um panorama abrangente de avaliação da situação, já que para cada elemento foram encontrados todos os tipos de condições existentes nos formulários de avaliação, desde sistemas considerados em

boas condições até aqueles classificados com a pior condição. Logo, essa representação holística dos sistemas de infraestrutura pôde fornecer as combinações de situações para exemplificar a necessidade e a importância do acompanhamento da condição dos elementos.

O apontamento da severidade, abrangência e extensão se mostrou adequado para o contexto do trabalho, porém para que se torne ainda mais coerente com a realidade registrada, recomenda-se o cálculo da condição dos pavimentos por outros métodos, como por exemplo Distress Manifestation Index Network Level (DMINL, 2010) e Urban Pavement Condition Index (UPCI, 2015), além do levantamento da condição de demais elementos presentes na via que possam influenciar na condição dos pavimentos.

Embora não fosse objetivo da pesquisa sugerir propostas de manutenção para os elementos avaliados, a classificação dos níveis de severidade juntamente a integração dos dados dos elementos, apresentou-se como um instrumento viável para o planejamento e apontamento de prioridades de intervenção nas vias, assim como avaliações de aceitabilidade do estado de funcionalidade e serventia dos elementos, podendo assim estabelecer metas para possíveis intervenções de manutenção por parte dos órgãos responsáveis.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM International. (2018), *ASTM D6433-18, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surve*. DOI: <https://doi.org/10.1520/D6433-18>
- Bernucci, L. B., et al. (2008), “*Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.*” 1ºed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2003). *NORMA 006/2003 – PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento*. Rio de Janeiro: DNIT.
- Francisco, M. R. P., Dantas Neto, J. (2021), *A282 Água: uso racional e sustentável*. 113 f.: il. color. Campina Grande: EPTEC.
- Lima, W. A. S., Sousa, J. P., Matos, O. S., Silva, F. G. S., Oliveira, M. M., Pacheco, G. V. (2022), *Sistemas de drenagem: a importância para a infraestrutura do transporte rodoviário brasileiro*. Brazilian Road Transport Infrastructure, v.8, n.3, p. 17813-17831. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-153>
- Medeiros, R. S., Albuquerque, T. P., Morais, L. M. B., Araújo, L. G. C., Melo, R. A. (2018), “*Avaliação Das Condições De Conservação De Pavimentos, Drenagem E Calçadas Em Vias Da Cidade De João Pessoa.*” 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, p. 1297–1308.
- Mergh, L. S. (2019), “*Análise de Indicadores da Gestão de Produção em Obras Corporativas*”, Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Novaes, M. P., Carvalho, M. B., Silva, D. C., Rodrigues, H. S., Amorim, M. C. C. (2019), *Avaliação das condições de infraestrutura em drenagem pluvial urbana no município de Curaçá-BA*. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 25043-25048. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-178>
- Oliveira, T. S., Anjos, J. S., Ribeiro, S. E., Oliveira, D. M. (2022), *Análise Descritiva e de Correlação dos Indicadores de Desempenho: Custo, Prazo E Ritmo*. Revista de Engenharia e Tecnologia. V. 14, Nº. 1, 2022. ISSN 2176-7270
- Pires, J. C. M., Mendes, A. T. (2021), *Manifestações patológicas em pavimentação asfáltica: estudo de caso na TO-050, no trecho do anel viário em Porto Nacional/TO*. Engineering Sciences, v.9, n.1, p.28-39. <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.001.0004>

Resplandes, I. S., Toledo, F. R. S., Resplandes, H. D. de A., Santos, W. S., Borges, K., Carvalho, C. M. (2021). *Ausência de sistemas de drenagem urbana nos pavimentos de Santana do Araguaia-PA e seus impactos*. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 7(1), 12111–01. <https://doi.org/10.18540/jcecvl7iss1pp12111-01-09e>

Silva, A. N. A., Diniz, M. I L., Melo., R. A. (2020). “*Avaliação das condições do pavimento em vias urbanas na cidade de João pessoa/PB: uma comparação entre índices*” in: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Anais do 34º ANPET - Infraestruturas.

Gestão Total da Corrosão. Análise documental

M. Donadio^{1*}, J. Capacho², L. Santander³

* Autor de Contato: donadio.michel@fr.sika.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

Recebido: 27/02/2023 | Correções recebidas: 17/04/2023 | Aceito: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo deste relatório é apresentar as diferentes técnicas de mitigação da corrosão atualmente disponíveis, tais como argamassas de reparo, inibidores de corrosão (ativos ou passivos), revestimentos de proteção e proteção catódica por corrente induzida ou galvânica. As estruturas, construídas para durar muito tempo, estão sujeitas ao envelhecimento precoce devido a influências ambientais como água, dióxido de carbono atmosférico e outros elementos nocivos, como cloretos e poluição. O processo de deterioração mais comum em estruturas de concreto armado é a corrosão e posterior expansão devida aos produtos de corrosão do aço, levando à fissuração e ao destacamento superficial do concreto.

Palavras-chave: corrosão; inibidor de corrosão; proteção catódica; ânodos galvânicos.

Citar como: Donadio, M., Capacho, J., Santander, L. (2023), “Gestão Total da Corrosão. Análise documental”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 235 – 253, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

¹ Technical Manager, Sika Services AG, Suíça.

² Business Development Manager LATAM, Sika Mexicana SA de CV, México

³ Product Engineer, Sika Mexicana SA de CV, México.

Contribuição de cada autor

este trabalho o autor Michel Donadio escreveu o artigo. Os autores Luis Santander e Juan Capacho fizeram contribuições e adaptações de forma e conteúdo.

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 primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Total Corrosion Management. Documentary analysis

ABSTRACT

The aim of this report is to provide a documentary analysis of the different corrosion mitigation techniques currently available, such as repair mortars, active and passive corrosion inhibitors, protective coatings and galvanic or induced current cathodic protection. These structures, built to last for a long time, are subject to ageing due to environmental influences such as water, atmospheric carbon dioxide and other harmful elements such as chlorides and pollution. The most common deterioration process in reinforced concrete structures is corrosion and subsequent expansion of the steel reinforcement, leading to cracking and spalling of the concrete.

Keywords: Corrosion; corrosion inhibitor; cathodic protection; galvanic anodes.

Gestión integral de la corrosión. Análisis documental

RESUMEN

El objetivo de este informe es hacer un análisis documental sobre las diferentes técnicas de mitigación de la corrosión disponibles en la actualidad, como los morteros de reparación, los inhibidores activos y pasivos de la corrosión, los revestimientos protectores y la protección catódica con corriente inducida o galvánica. Estas estructuras, construidas para durar mucho tiempo, están sometidas al envejecimiento por influencias de su entorno, como el agua, el dióxido de carbono atmosférico y otros elementos nocivos como los cloruros y la contaminación. El proceso de deterioro más común en las estructuras de concreto armado es la corrosión y la consiguiente dilatación de la armadura de acero, lo que provoca la fisuración y el desconchado del concreto.

Palabras clave: corrosión; inhibidor de corrosión; protección catódica, ánodo galvánico.

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

As estruturas de concreto armado, como edifícios, pontes, etc., estão projetadas para durar muito tempo; não é raro que as estruturas das pontes tenham uma vida útil de 100 anos ou mais. Tendo o cobrimento de concreto correto com uma dosagem apropriada, o concreto geralmente fornece a proteção contra a corrosão necessária para as barras de aço em seu interior.

Durante a hidratação, o cimento gera cal hidratada, que produz um ambiente altamente alcalino na solução de poro da matriz cimentícia. Desta forma, as barras de aço são mantidas em uma condição passivada, pois a formação de óxidos de ferro está presente na superfície do aço. No entanto, devido ao processo natural de carbonatação, o concreto pode perder progressivamente sua alta alcalinidade, ou devido a ação localizada de cloretos, os óxidos de ferro estáveis podem descompor-se, o que significa que as barras de aço já não estarão em um ambiente passivo, e podem começar a corroer-se.

A corrosão das armaduras de aço no interior no concreto se comporta da mesma forma que a corrosão de um metal em soluções eletrolíticas, a corrosão se produz sempre nos ânodos como está descrito na figura 1.

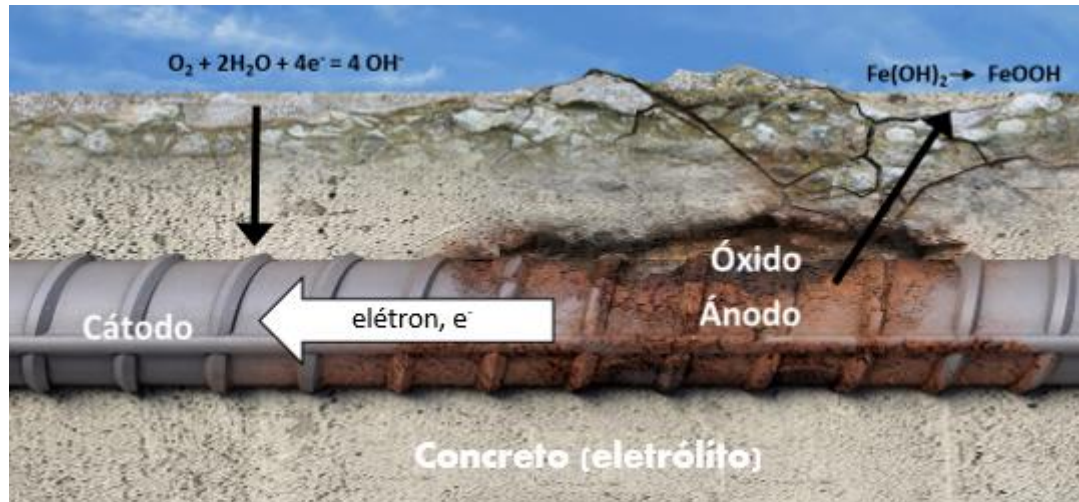


Figura 1. modelo esquemático da corrosão do aço da armadura no concreto.

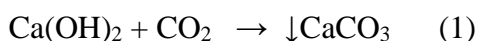
As condições necessárias para que ocorra a corrosão do aço são:

- Perda de passividade (devida a carbonatação, ou pela presença de cloretos).
- Umidade nos poros de concreto (eletrólito).
- Presença de oxigênio perto das armaduras.

As três condições devem estar presentes para que o aço seja corroído.

1.1 Corrosão induzida por carbonatação

Quando o dióxido de carbono atmosférico se encontra com a cal hidratada na solução de poro do concreto não carbonatado, se produz uma reação de carbonatação, e o hidróxido de cálcio altamente alcalino (Ca(OH)_2 com um pH ~13), procedente da cal hidratada, se converte em carbonato de cálcio pouco alcalino (pH ~9), relativamente insolúvel, como se observa na equação 1:



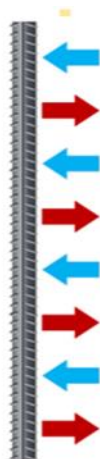


Figura 2. Adaptado de Angst. O ânodo e o cátodo são de tamanho similar na corrosão induzida por carbonatação.



Figura 3. Corrosão induzida por carbonatação em zonas de ausência ou cobertura inadequado de concreto.

A corrosão iniciada por carbonatação gera uma série de microcélulas anódicas/catódicas (figura 2), que conduzem ao que pode ser uma corrosão generalizada, mas que progride com bastante lentidão, normalmente uma redução de 1/100 a 1/10 mm da armadura por ano (Angst et al, 2020). Este tipo de corrosão afeta com frequência grandes áreas de armadura próximas de superfícies de concreto expostas em zonas de ausência ou cobertura de concreto inadequado, como o muro da fachada do edifício que se mostra na figura 3 .

1.1.1 Corrosão induzida por cloretos

Ocorre até em condições alcalinas de concreto carbonatado ou não, quando há penetração por difusão de íons cloreto, por exemplo, em atmosferas marinhas ou quando se aplica sais de degelo, ou ambientes industriais. Assim que uma certa concentração de cloretos atinge a superfície do aço da armadura, pode acarretar a temida corrosão por pites (Silva, 2013), com a formação de áreas anódicas alternadas com catódicas, como se mostra nas figuras 4 e 5:

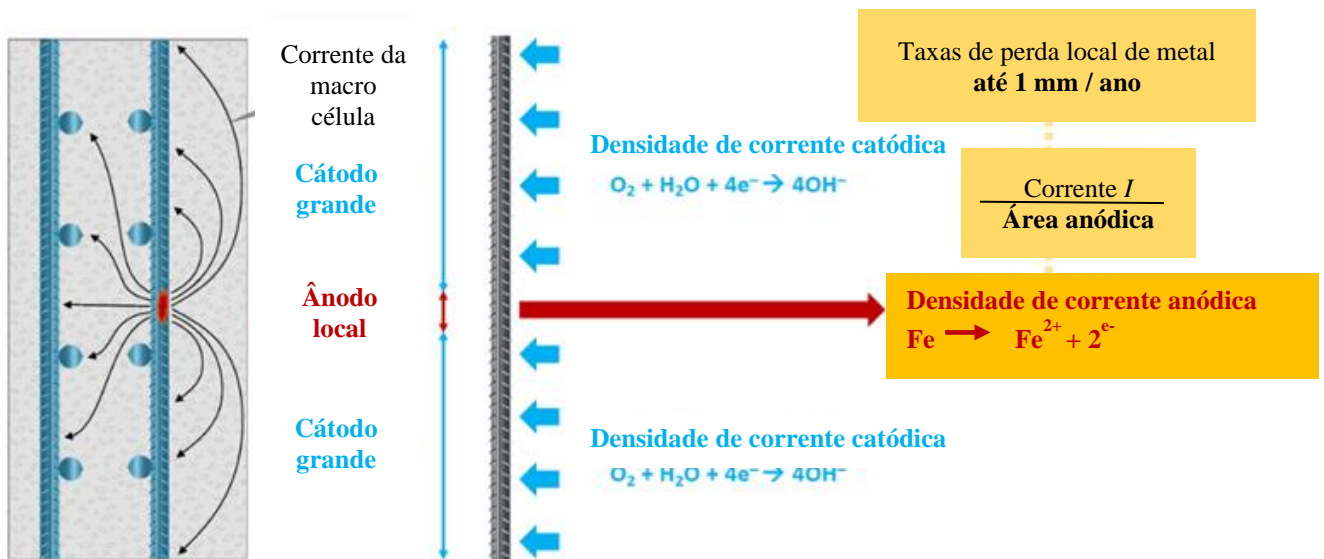


Figura 4. Adaptado de Angst. formação de um ânodo localizado no concreto contaminado com cloreto.



Figura 5. Corrosão típica induzida por cloretos com formação de pites.

A velocidade da corrosão induzida por cloreto pode ser rápida, em geral localizada e produz poucos sinais visíveis externamente, até que os produtos da corrosão expandam e destaquem o concreto de cobertura, como ilustrado na figura 6. O colapso repentino e devastador das estruturas devido a esta perda local da seção transversal da armadura pode ocorrer, sem sinais significativos de aviso prévios.

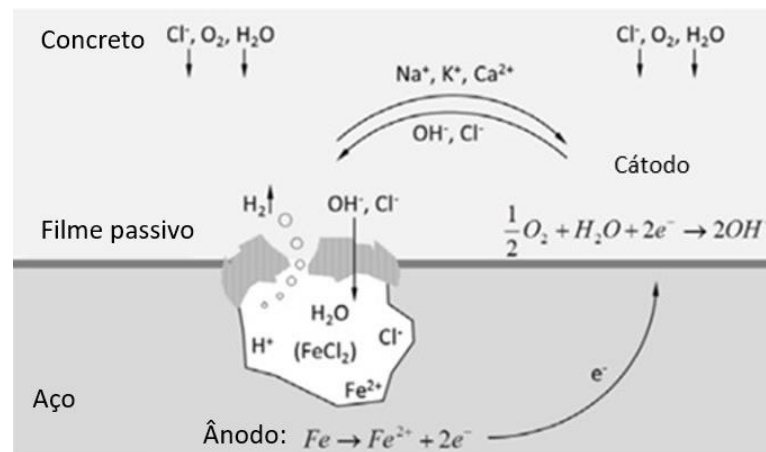


Figura 6. Adaptado de Silva (Silva, 2013). Representação esquemática da corrosão por pites induzida por cloretos.

1.1.2 Sistemas para a gestão da corrosão

Existem diferentes tipos de sistemas para a gestão da corrosão, que permitem resolver os problemas ao redor da corrosão nos aços da armadura:

- Argamassas de reparo para o concreto
- Inibidores de corrosão ativos e passivos
- Cobrimentos anti-carbonatação
- Proteção catódica contra corrosão induzida por corrente
- Ânodos galvânicos (instalados na armadura, discretos e aplicados em superfície)

Outros sistemas disponíveis não mencionados nas normas europeias EN 1504, no entanto, não serão abordados neste artigo.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise documental sobre um dos sistemas mais usados para gerenciamento da corrosão mencionada anteriormente.

2. SISTEMAS PARA A GESTÃO DA CORROSÃO

2.1 Argamassas de reparo para o concreto

A corrosão da armadura de aço afeta o uso de muitas estruturas de concreto. A recuperação localizada é uma técnica comum que implica a eliminação do concreto deteriorado fisicamente (por exemplo, mecanicamente com martelos demolidores ou mediante hidrodemolição), a limpeza das superfícies de aço expostas e, em seguida, a restauração do perfil original com uma argamassa ou argamassas de recuperação adequadas.

Este processo deixa o aço da zona de recuperação em estado passivo (Page & Sergi, 2000).

Em um número significativo de casos, foram observados danos posteriores induzidos pela corrosão no que parecia concreto são na área imediatamente ao lado das recuperações realizadas, como se vê na figura 7. Em certas ocasiões, isso ocorreu alguns meses depois de finalizado o processo de recuperação localizada (Qian, et al 2006). Este fenômeno é conhecido como formação de ânodos incipientes ou em anel, o efeito “halo” (Bertolini, et al 2004).

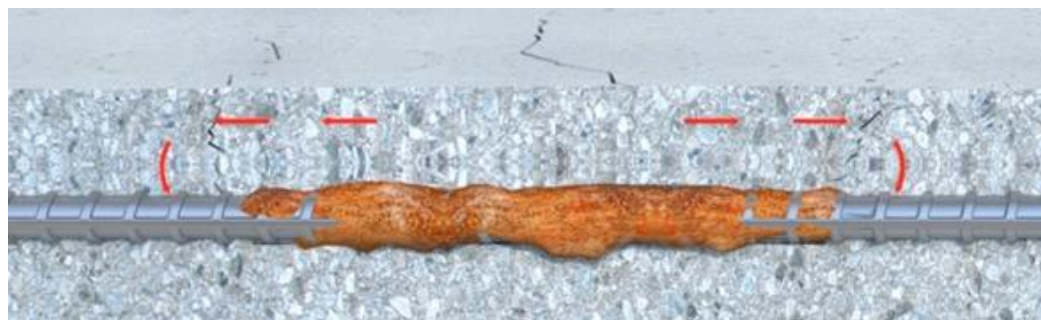


Figura 7. Deslocamento superficial devido a corrosão por cloretos.

O conceito de que a atividade macro celular (a formação de ânodos e cátodos separados espacialmente) causa o efeito de ânodo incipiente, foi introduzido pela primeira vez por Page e Treadaway (Page & Treadaway, 1982). Os autores sugeriram que a redistribuição das regiões anódicas e catódicas próximas da região recuperada do concreto afeta o risco futuro de corrosão. Christodoulou (Christodoulou, 2012) sustenta a opinião generalizada de que a causa dos ânodos incipientes é a perda da proteção catódica natural que fornece o aço em corrosão ao aço da base de concreto adjacente ao trecho recuperado.

O projeto Conrep (Tilly et al , 2007) indica que, na Europa, 20% dos trabalhos de recuperação caíram em 5 anos e 55% em 10 anos. O documento também indica que apenas 30% das recuperações parciais se comportam bem quando utilizadas de forma isolada, enquanto que esta

percentagem aumenta para 50% quando se combina com um revestimento protetor de superfície. Portanto, podemos retomar o processo de ânodo incipiente do seguinte modo:

- O deslocamento devido à corrosão induzida pelo cloreto do aço da armadura se produz nas zonas anódicas.
- A extração do concreto é realizada nessas zonas afetadas.
- A recuperação é feita com um material próprio à base de cimento patenteado, que é altamente alcalino.
- A zona recém recuperada passa a ser uma zona catódica (devido à alta alcalinidade da argamassa de recuperação).
- As zonas catódicas que migram para as zonas anódicas (zonas deslocadas) se convertem agora em zonas anódicas, já que são menos alcalinas que a argamassa de recuperação recém aplicada e o mais provável é que contenham alguns cloretos.
- O aço da armadura que antes se encontrava nas zonas catódicas protegidas já não se encontra num ambiente de passivação, já que esta zona se converteu num ânodo.
- A aceleração da corrosão se produz então nestas zonas anódicas recém-formadas (que contornam as zonas de recuperação parcial); consulte as figuras 7 e 8.

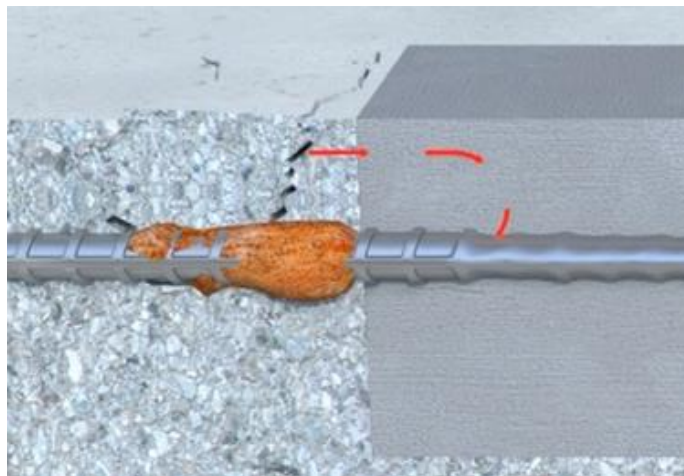


Figura 8. Deslocamento na área adjacente devido a corrosão por ânodo incipiente.

Por isso, especialmente no caso de corrosão da armadura induzida por cloreto, a recuperação do concreto com argamassas adequadas por si só, não poderia fornecer a eficácia desejada por um longo período.

Em consequência, os trabalhos de recuperação por trechos devem ser combinados com sistemas adequados de proteção superficial para evitar a formação de ânodos incipientes.

2.2 Inibidores de corrosão

Um inibidor é uma substância que atrasa ou retarda a velocidade de uma reação química. Um inibidor de corrosão é definido como uma substância que retarda o início da corrosão ou reduz a velocidade de corrosão do aço existente.

Os inibidores de corrosão para concreto armado estão disponíveis como aditivos que podem ser misturados com o concreto, à argamassa ou concreto de recuperação, ou como produtos de impregnação aplicados na superfície; este último é o tipo mais comumente utilizado para os trabalhos de recuperação de concreto.

Existem dois tipos principais de inibidores de corrosão no mercado:

- Inibidores ativos que requerem que o componente ativo penetre e alcancem as armaduras

para poder fornecer uma película contínua na superfície, que protege as barras de aço da corrosão.

- Inibidores passivos que agem de forma diferente, impedindo que a água líquida penetre e migre através do concreto, permitindo ao mesmo tempo a evaporação da umidade de vapor. Isso aumenta a resistência do concreto que protege o aço da armadura. Uma vantagem desta técnica é que também evita a futura entrada de cloreto na estrutura.

2.2.1 Inibidores ativos da corrosão

Também existem no mercado diferentes tecnologias de inibidores ativos de corrosão:

- Inibidores da corrosão anódica que suprimem a reação anódica - o produto típico é o inibidor à base de nitrito. Seu uso pode ser crítico se sua concentração não for alta o suficiente, pois pode produzir uma corrosão acelerada.
- Inibidores da corrosão catódica que ativam a própria reação catódica ou precipitam seletivamente nas zonas catódicas para aumentar a impedância da superfície e limitar a difusão de espécies redutíveis a estas zonas. Os produtos típicos são o composto de zinco (precipitação de óxido que forma uma película protetora sobre a barra de aço) ou o sulfito de sódio que atua como sequestrador de oxigênio. Se considerar seguros, eles são menos eficazes do que os inibidores anódicos.
- Inibidores de corrosão ambiódicos (mistos) que atuam simultaneamente nas zonas anódica e catódica. Esta classe de inibidores tem um efeito sinérgico, combinando os benefícios dos tipos anódico e catódico, inclusive em dosagens baixas. Não se encontrou nenhuma aceleração da corrosão, apenas um redutor de efeito.

Os inibidores ambiódicos geralmente são baseados em uma mistura de um aminoálcool e seu sal de aminoácido. Estes são muito pequenos e muito voláteis, e não reagem ao cimento, pelo que podem migrar livremente para dentro da matriz de cimento (Tritthart, 2002).

Em resumo, os inibidores de corrosão ambiódicos:

- Penetram no concreto tanto na fase líquida como de vapor
- Transferem hidróxidos na superfície do aço em concreto carbonatado
- Transferem cloretos na superfície do aço (em determinadas condições)
- Formam uma capa química adsorvida de 100-1000 angstrom (0,00001 a 0,0001 mm) de espessura na superfície da armadura de aço.
- Reduzem a dissolução de ferro no ânodo
- Reduzem o acesso de oxigênio no cátodo

No entanto, em muitos países, a tecnologia dos inibidores ativos de corrosão aplicados em superfície teve apenas uma aceitação limitada e, de fato, podem apresentar limitações significativas quanto ao seu uso e eficácia:

- A primeira limitação é sua capacidade de migrar em quantidade suficiente para ser eficaz. Se o concreto for de alta qualidade e/ou o revestimento for relativamente importante, então a capacidade da molécula inibidora para migrar para a profundidade em quantidade suficiente ao nível das barras da armadura é limitada. Esta situação é a mais provável nas estruturas de engenharia civil.
- A segunda limitação importante se produz quando há cloretos presentes no concreto. De acordo com a experiência e as intensas investigações como o projeto SAMARIS (SAMARIS, 2003-2005), esses inibidores não são eficazes se houver uma elevada concentração de cloretos junto às barras de aço.

Em resumo, para as estruturas marítimas ou de engenharia civil expostas a sais de degelo, os inibidores ativos da corrosão, aplicados na superfície, não são a solução ideal para mitigar a corrosão existente.

No entanto, existem alguns resultados positivos para o uso destes inibidores na corrosão induzida por cloreto - o projeto SAMARIS também apresenta um deles - Fleet Flood Bridge, onde o inibidor foi utilizado com êxito para resolver o problema da corrosão incipiente do ânodo.

Como mostra Heiyantuduwa (Heiyantuduwa, 2006) e Taché (Taché, 2000) (veja a figura 9 onde se nota uma redução acentuada da corrosão com o efeito dos inibidores que são aplicados antes ou depois da carbonatação acelerada), esta tecnologia funciona melhor em concreto armado com corrosão do aço induzido por carbonatação por três razões principais:

- A corrosão induzida pela carbonatação está associada a um baixo cobrimento do concreto. Portanto, é mais fácil que o inibidor chegue à armadura.
- A carbonatação é produzida principalmente em concretos de menor qualidade, por isso sua densidade é menor e, em consequência, há uma maior penetração (profundidade e intensidade) do inibidor.
- A velocidade de corrosão associada à carbonatação é relativamente lenta, por isso é mais fácil que o inibidor seja eficaz.

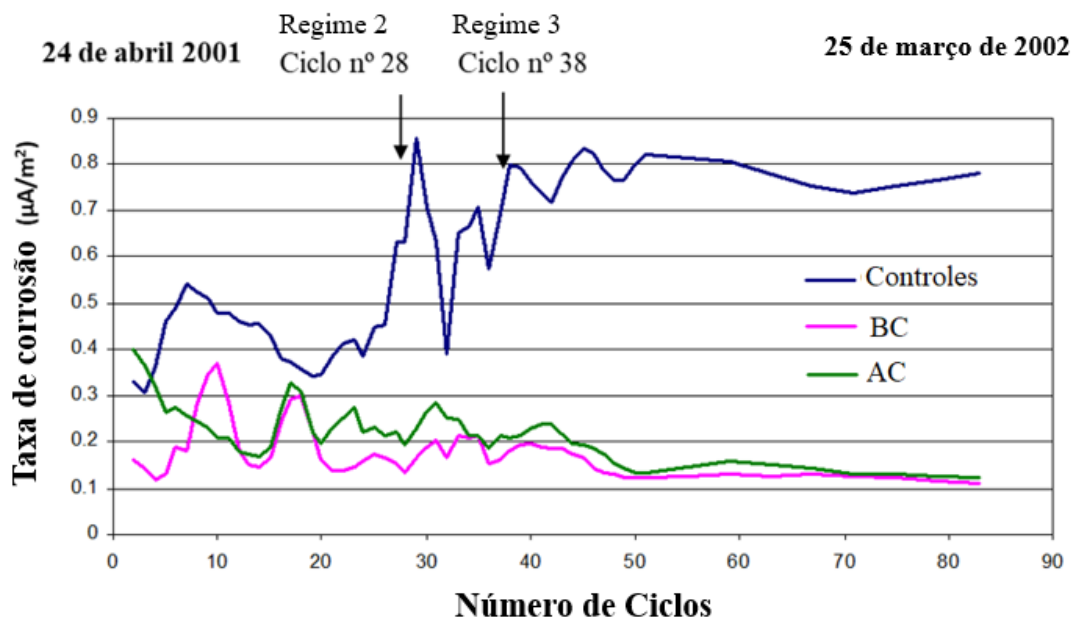


Figura 9. Concreto carbonatado – efeito do inibidor ambiótico (aplicado antes e depois da carbonatação). (Heiyantuduwa, 2006)

Quando se mostra adequada, a tecnologia de inibidores ativos da corrosão é uma técnica muito econômica.

Normalmente, os inibidores ativos da corrosão são mais eficazes para reduzir a corrosão induzida pela carbonatação nos edifícios que para mitigar a corrosão induzida pelo cloreto na engenharia civil ou nas estruturas marítimas.

2.2.2 Inibidores passivos da corrosão

Como indicado anteriormente, os inibidores passivos da corrosão atuam aumentando significativamente a resistividade do concreto ao nível das barras de aço. Os inibidores passivos do tipo silano concentrados com um conteúdo ativo em torno de 80% para os tipos mais densos, ou superior a 95% para os tipos líquidos, são soluções eficazes para reduzir a penetração da água em estruturas de concreto. Numerosos estudos de campo atestam também sua longa duração. Christodoulou (Christodoulou, et al 2012) demonstrou que "os tratamentos realizados há 20 anos podem seguir proporcionando um efeito protetor residual".

Estes inibidores passivos de corrosão são muito eficazes para evitar a migração de cloreto para o concreto. Eva Rodum (Rodum, 2012) realizou testes em estruturas existentes e demonstrou que as impregnações hidrófobas de diferentes formas são muito eficazes para evitar a migração de cloreto, até 10 anos após sua aplicação (veja a figura 10) onde o concreto de referência tem uma quantidade de cloreto muito elevada enquanto as amostras tratadas com os diferentes tratamentos hidrofóbicos têm níveis de cloreto próximo de zero. Os estudos realizados por M. Brem (Brem, et al 2022) durante um período de 11 anos mostram que a velocidade de corrosão e a resistividade elétrica do concreto estão muito bem correlacionadas, o que confirma que a reação de corrosão está controlada principalmente pela quantidade de umidade do concreto ao nível da armadura de aço. Neste estudo, um silano denso foi aplicado no concreto deixando uma parte sem aplicação como referência. Foi instalado um sistema de monitoramento que permite medir a resistividade em diferentes profundidades no concreto e a atividade de corrosão das armaduras. Depois de 11 anos, não houve penetração de umidade na zona tratada (em azul na figura 11) com uma atividade de corrosão quase nula. Do outro lado, notou-se uma atividade de corrosão alta e grande umidade na zona não tratada (em preto na figura 11). Este estudo também mostra a vantagem positiva deste tratamento com silanos em termos de longevidade e proteção contra a corrosão.

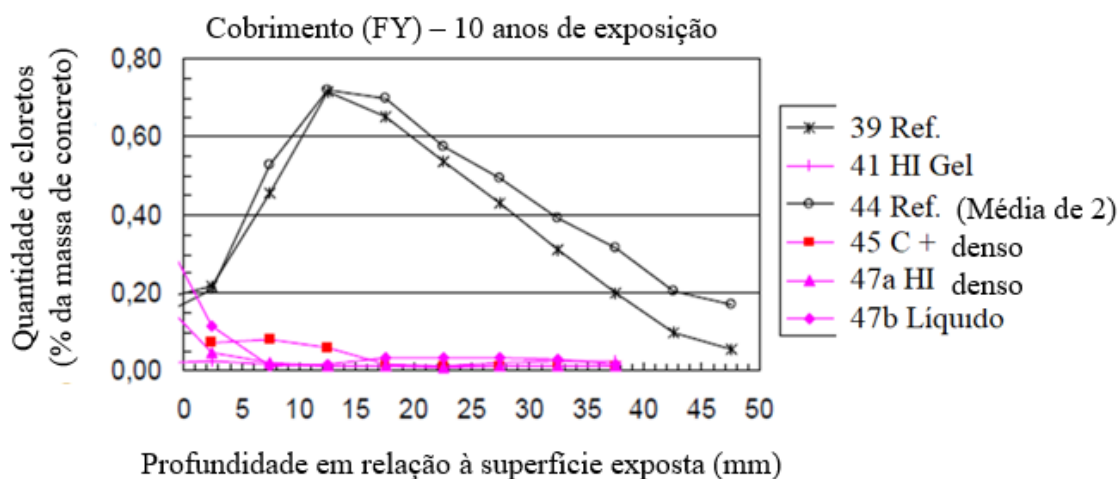


Figura 10. Perfis de cloreto do concreto da parte inferior de uma doca na Noruega. (Rodum, 2012)

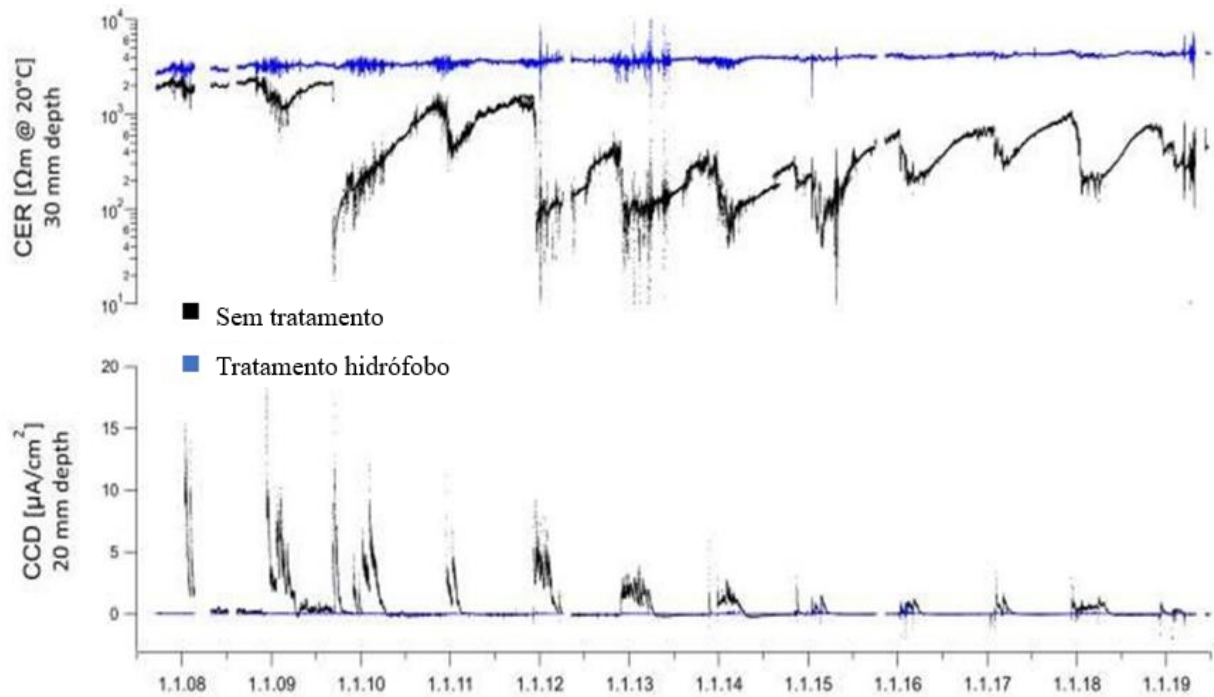


Figura 11. Resistividade elétrica do concreto CER (acima) e densidade de corrente de corrosão CCD (abaixo) de superfícies não tratadas (preto) e tratadas (azul) com uma impregnação hidrófoba densa de um trecho de um túnel durante um período de 11 anos (Brem et al. 2022).

Em resumo, os inibidores passivos da corrosão são muito eficazes para prevenir a longo prazo a corrosão induzida por cloreto.

Seus recursos para mitigar a corrosão existente são mais discutíveis e suas eficácias podem depender do nível de corrosão e de seus recursos para penetrar o suficiente na superfície do concreto (sem necessidade de alcançar as barras de armadura). Além disso, o concreto deve seguir permitindo a difusão do vapor em cada direção para que a umidade se evapore e o concreto seque ao nível da armadura.

2.3 Revestimentos de proteção

A principal função dos revestimentos de proteção das superfícies de concreto é geralmente controlar o avanço da frente de carbonatação na matriz de cimento.

Estes revestimentos também podem ser formulados para serem elásticos e preencher de forma eficaz as fissuras, mesmo a temperaturas muito baixas (até -20°C ou menos).

Dependendo do produto, a preparação da superfície e a aplicação podem observar uma durabilidade típica de 10-15 anos para um revestimento flexível de base acrílica e dispersão em água, ou de 15-20 anos para um revestimento de base rígida de resina metacrilato e dispersão em solvente (Mozaryn, et al 2009). Transcorrido este tempo, pode ser necessária uma aplicação de segunda demão para manter o desempenho protetivo. No entanto, há exemplos de que se observou uma degradação prematura, devido principalmente ao fato de a corrosão estar muito avançada, uma quantidade excessiva de umidade ou a uma preparação e aplicação inadequadas da superfície.

Uma vez realizadas as recuperações do concreto, podem ser utilizados revestimentos protetores para impedir a entrada futura de elementos negativos (por exemplo, cloreto e CO_2), e para fornecer um aspecto visual homogêneo do substrato, ocultando as diferenças de cor devidas aos trabalhos de recuperação em trechos.

Os revestimentos de proteção transpiráveis atenuam a corrosão do mesmo modo que as impregnações hidrófobas, impedindo a entrada de agentes negativos (por exemplo, cloreto e CO_2)

e permitindo que o concreto seque.

Mas se a corrosão está muito avançada e/ou se não são utilizados revestimentos transpiráveis, existe o risco de que a umidade fique presa com todos os materiais presentes no concreto para que a corrosão continue.

2.4 Proteção Catódica

Existe uma norma europeia atualizada de elaboração recente que é aplicável: Proteção catódica do aço em concreto (ISO 12696:2016). Esta norma é válida tanto para a proteção catódica por corrente induzida quanto para a proteção galvânica.

2.4.1 Proteção catódica por corrente induzida

A proteção contra a corrosão é obtida através da instalação de um ânodo, por exemplo, de titânio, na superfície do concreto e conectado diretamente às armaduras (consulte a figura 12).

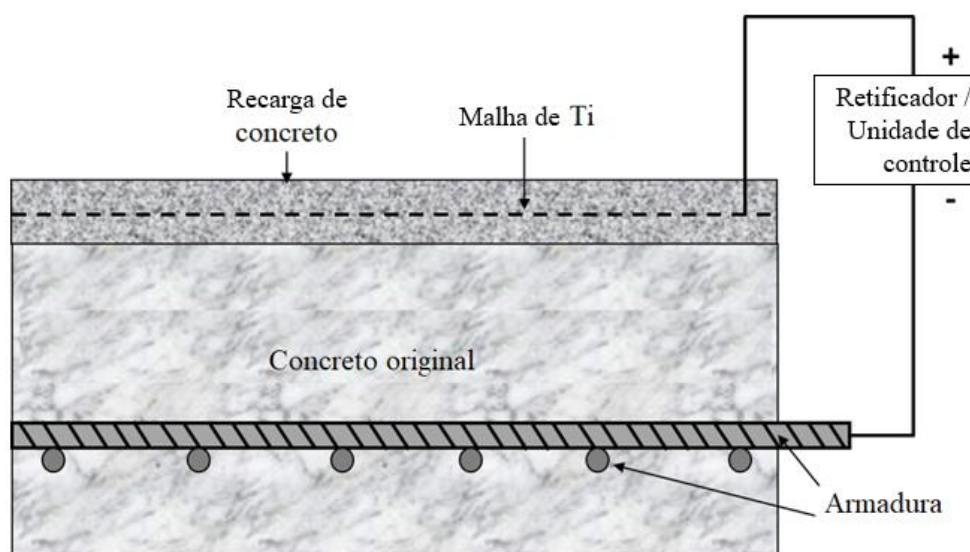


Figura 12. Proteção catódica por corrente induzida.

Através deste sistema circula uma corrente que mantém as armaduras na zona catódica, o que significa que não pode produzir corrosão nesta zona, mesmo na presença de altos teores de cloreto. Quando instalado corretamente, é o único sistema disponível que detém por completo as atividades de corrosão. No entanto, o design e a instalação desses sistemas requerem um alto nível de qualificação. Também requer um fornecimento contínuo de corrente elétrica e um controle contínuo durante toda a vida útil para garantir que o sistema funcione corretamente. A falta deste serviço pode provocar efeitos destrutivos da corrente induzida na estrutura.

O Programa Nacional de Investigação Cooperativa em Rodovias de EE.UU., em sua síntese 398 (National Cooperative Highway Research Program, 2009), sugere que muitas agências não executam, nem a supervisão nem a manutenção, ou o fazem de forma insuficiente, e que esta é a razão mais importante do desempenho deficiente de muitos destes sistemas.

Resumindo, a proteção catódica por corrente induzida é um sistema muito eficaz para deter as atividades de corrosão, mas é muito complexo de projetar e instalar, além de muito caro para instalar, administrar continuamente e supervisionar durante toda a sua vida útil.

Além disso, esta técnica é a única que pode ser utilizada eficazmente em estruturas de concreto

protendido com medidas adicionais como precaução devido ao risco de fragilização por hidrogênio.

2.4.2 Proteção Galvânica

A proteção galvânica contra a corrosão do aço no concreto se baseia na formação de um elemento galvânico se um metal menos nobre que o aço (figura 13), em contato direto com o cobrimento do concreto, se conecta eletricamente às barras de aço de armadura. O aço de armadura fica protegido da corrosão enquanto flui corrente galvânica suficiente entre o elemento galvânico (que atua como ânodo) e a armadura de aço (que atua como cátodo). O mais habitual é usar o zinco como elemento de sacrifício/material anódico. A célula galvânica que se forma corresponde a uma pilha convencional de zinco/ar. A primeira aplicação conhecida de um sistema galvânico de proteção contra a corrosão para o concreto armado foi no tabuleiro de uma ponte em Illinois em 1977.

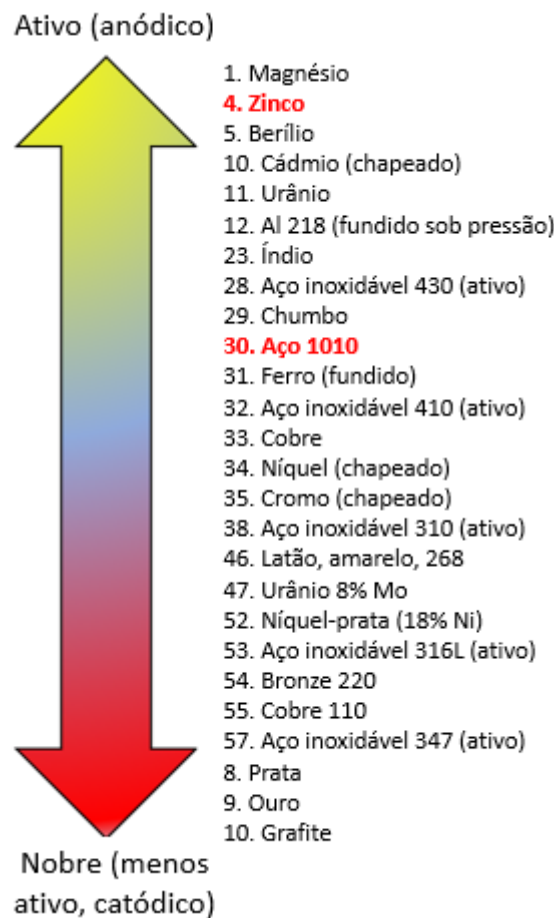


Figura 13. Diferença de potencial de vários metais.

A eficácia da proteção galvânica contra a corrosão depende da atividade permanente e da durabilidade do ânodo de zinco. No entanto, a passivação do ânodo de zinco mediante a formação de uma capa passiva que reduz o fluxo de corrente na superfície do zinco pode ser devida a:

- Deposição de produtos anódicos (corrosão do zinco) na superfície do elemento de zinco.
- Contato com hidróxido de cálcio alcalino na solução de poros de concreto.

Os primeiros sistemas galvânicos aplicados em estruturas de concreto armado sofreram uma rápida passivação dos ânodos de zinco, por isso que perdem seu efeito protetor em pouco tempo. Esta passivação teria que ser solucionada mediante a introdução de agentes de ativação adequados, que também poderiam provocar uma autocorrosão excessiva, consumindo até 70% do zinco sem produzir a protetora corrente necessário.

Os estudos críticos sobre os resultados desiguais das primeiras aplicações criam resistência ao uso de sistemas galvânicos até agora em alguns países. Foram realizados enormes esforços de investigação e pesquisa para desenvolver melhores ânodos galvânicos com uma ativação equilibrada para uma eficácia duradoura. Todos os métodos que foram desenvolvidos com sucesso até a data estão amplamente protegidos por patentes. No entanto, agora também há testes de uma vida útil do sistema patenteado há mais de 20 anos.

Existem vários sistemas de proteção galvânica:

- Mitigação de ânodos incipientes:
 - Ânodos inseridos na região reparada
 - Ânodos discretos instalados na periferia da zona reparada
- Controle da corrosão em concreto contaminado:
 - Ânodos discretos híbridos
 - Ânodos discretos galvânicos
 - Ânodos instalados em superfície

As vantagens típicas dos sistemas galvânicos sobre a proteção catódica por corrente impressa são:

- Não demanda cabeamento externo dos ânodos (sem riscos de roubos do cabo de cobre)
- Instalação simples, custo relativamente baixo
- Sem risco de fragilização por hidrogênio em cordoalhas protendidas
- Densidade de corrente autoajustável
- Não requer manutenção e supervisão contínua (embora sempre se recomende a supervisão quando se requer uma vida útil superior a 15 anos).

2.4.2.1. Mitigação dos ânodos incipientes

Estes ânodos são colocados e embutidos na zona de recuperação (figura 14), sendo necessária a utilização de uma argamassa com uma resistividade específica para preencher a região (Lozinguez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014), ou no interior do concreto que o envolve a área de reparo (Figura 15). A eficiência desses ânodos não depende da resistividade da argamassa que é usada para preencher o trecho de recuperação (Lozinguez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) para resolver o problema de corrosão incipiente dos ânodos.

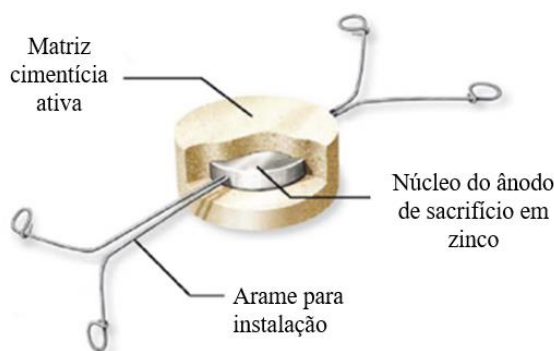


Figura 14. Corte de um ânodo para instalação em um trecho de recuperação.



Figura 15. Ânodos a serem instalados na área adjacente de um trecho de recuperação.

A tecnologia de ânodo galvânico para proteção contra corrosão de concreto armado está disponível há mais de 20 anos.

Sergi George (George et al, 2010) demonstraram, a partir de vários experimentos de campo, a durabilidade a longo prazo desses ânodos e uma boa correlação entre sua vida útil estimada (a partir do consumo do ânodo) e a medição real do zinco residual restante no disco após 10 anos.

Ânodos colocados em áreas de reparo requerem o uso de uma argamassa de reparo de baixa resistência, o que infelizmente também limita o nível de qualidade da argamassa.

Quando os ânodos são colocados no concreto original fora dos trechos de recuperação, ou seja, fora, mas nas suas proximidades, os trabalhos de recuperação podem ser executados com argamassa de alta qualidade, uma vez que não há limitação da resistividade da argamassa. Em Cancun, no México, foi realizado um teste de campo, instalando ânodos dentro do concreto para proteger o aço da armadura contra o efeito incipiente da corrosão do ânodo. As medições no local mostraram o nível de proteção dos ânodos instalados (figura 16).



Figura 16. Instalação de ânodos no concreto com verificação de instalação em Cancún, México.

Alguns trabalhos independentes (Loziquez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) demonstraram a importância de se instalar os ânodos no concreto original das proximidades e não nas zonas de recuperação.

Trata-se de um sistema relativamente seguro, mas eficaz para evitar o desenvolvimento de ânodos incipientes, mesmo na presença de altos teores de cloreto em concreto são de boa qualidade. Se os ânodos forem instalados dentro do trecho recuperado, a argamassa de reparo para preenchimento deve ter uma resistividade específica. Caso contrário, se desejar usar os ânodos que estão perto do trecho, pode usar uma argamassa de alta qualidade.

2.4.2.2. Prevenção da corrosão com ânodos discretos

Estes ânodos são instalados em concreto contaminado e depois são unidos para produzir a corrente galvânica como se pode ver na foto da figura 17, onde se pode ver a preparação para a instalação destes ânodos e a sua união.

Algumas questões têm sido levantadas (Holmes et al, 2011) sobre a eficácia deste sistema, especialmente em estruturas de concreto com forte corrosão existente. Observou-se que, operando exclusivamente em modo galvânico, na presença de cloretos elevados, a corrente de saída dos ânodos é igual à dos ânodos colocados em concreto sem cloretos. Isso significa que a eficiência de ânodos discretos pode ser limitada se usada para interromper a corrosão em áreas de corrosão induzida por alto teor de cloreto.



Figura 17. Ânodos discretos em um parapeito de ponte.

O uso de ânodo galvânico é um sistema seguro, mas com limitações em zonas de alta corrosão induzidas por cloreto, pois no nível da corrente galvânica que libera os ânodos pode não ser suficiente para extrair os cloretos e, conseqüentemente, repassivar o aço.

2.4.2.3. Prevenção da corrosão com sistemas híbridos

Há mais de 15 anos, uma empresa com sede no Reino Unido patenteou e lançou no mercado um sistema híbrido que combina a corrente induzida e a proteção galvânica.

Durante a fase de corrente induzida (extração eletroquímica de cloretos, que é usada frequente e inicialmente durante 1 ou 2 semanas, em função da tensão utilizada), a armadura de aço torna-se passiva devido à formação de íons de hidróxido devido à saída de corrente induzida, enquanto os cloretos são eliminados do líquido poroso circundante. Uma vez que o aço fique passivo, desconecte a corrente e conecte os ânodos para que o sistema funcione no modo galvânico puro.

No estudo previamente mencionado, Holmes (Holmes et al, 2011), figura 18 comparou a atividade de um determinado ânodo de zinco contendo 2,5% de cloreto, operando em modo 100% galvânico, com o mesmo ânodo que havia sido previamente ativado por uma semana por uma corrente externa. Estes dois sistemas são comparados com a atividade do mesmo ânodo galvânico colocado em concreto sem cloreto. O estudo mostra que o ânodo que funciona em modo galvânico puro gera tanta corrente quanto o ânodo colocado em concreto sem cloreto, o que demonstra sua ineficácia para proteger o aço. Enquanto o ânodo que foi previamente ativado está muito ativo, devido à presença de cloreto. Se sacrifica no lugar do aço ao seu redor (veja a figura 19).

Caso necessário, pode-se instalar sistemas de monitoramento semelhantes aos instalados no sistema de proteção catódica por corrente induzida, usando um eletrodo de referência e seguir as recomendações da norma EN ISO 12696.

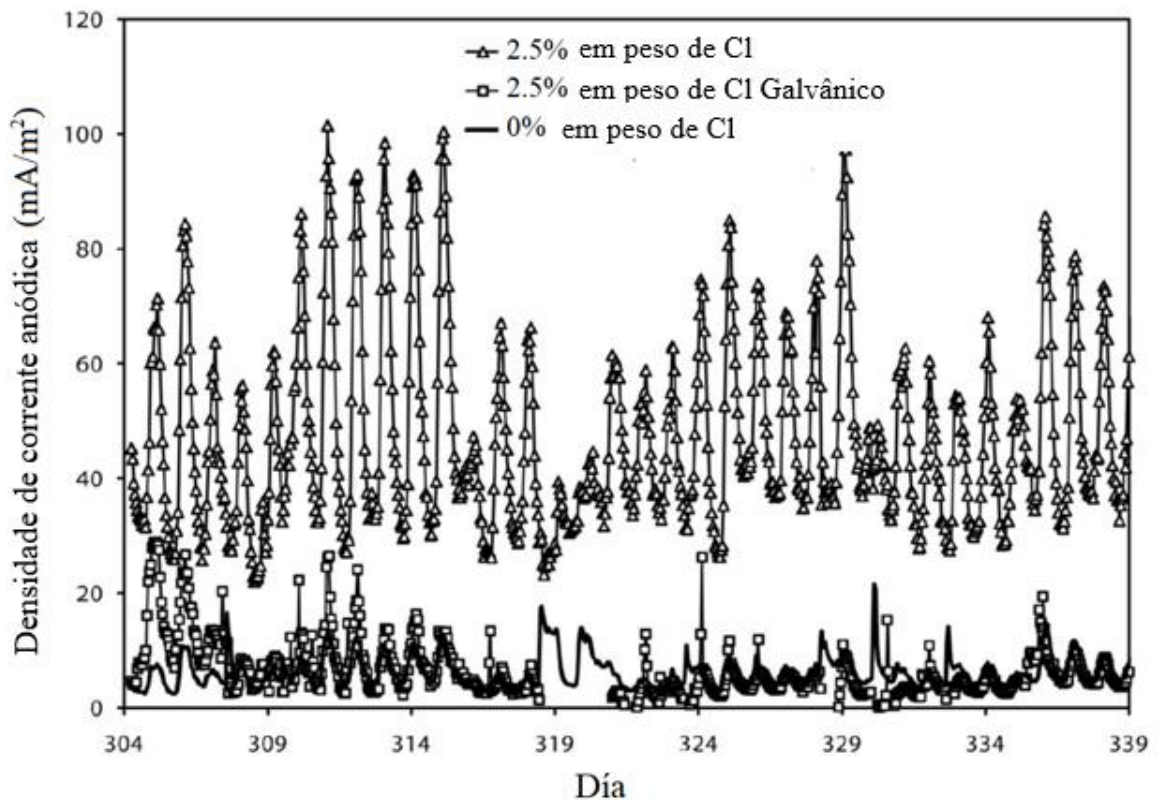


Figura 18. Comparação entre o ânodo (2,5% Cl. galvânico) funcionando no modo galvânico puro e o ânodo (2,5% Cl.) sendo ativado pela corrente induzida durante um curto período de tempo antes de funcionar no modo galvânico (Holmes e outros, 2011).

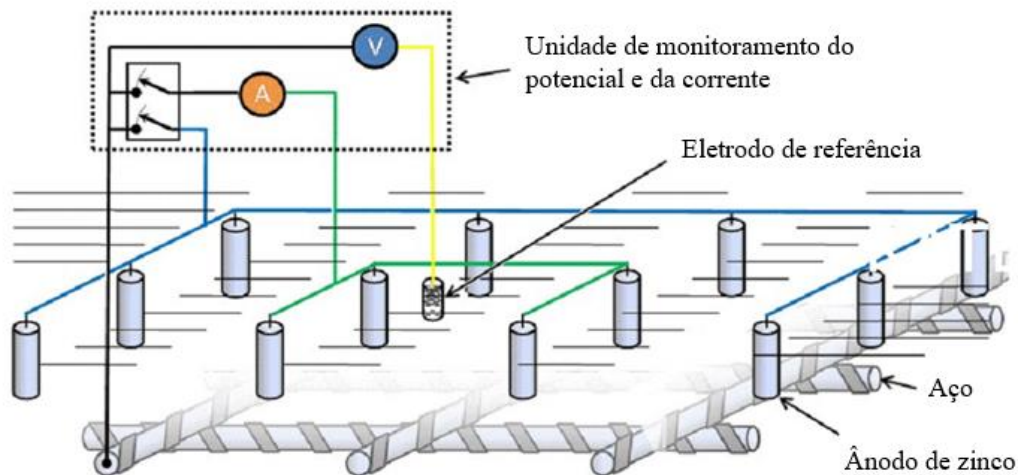


Figura 19. Descrição esquemática do sistema de monitoramento por eletrodo de referência

Instalado na Whiteadder Bridge, Escócia, Reino Unido, esse sistema híbrido permanece responsivo ao ambiente muito tempo depois de instalado (Dodds, 2018).

O sistema híbrido é bastante atrativo, conforme ilustrado na figura 20, pois oferece certo nível de garantia de funcionamento, como os oferecidos pelo sistema de proteção catódica de corrente induzida, pois é menos complexo e não exige os mesmos níveis de manutenção a longo prazo com ajuste constante da entrada de corrente, conforme exigido pelo PCCI.

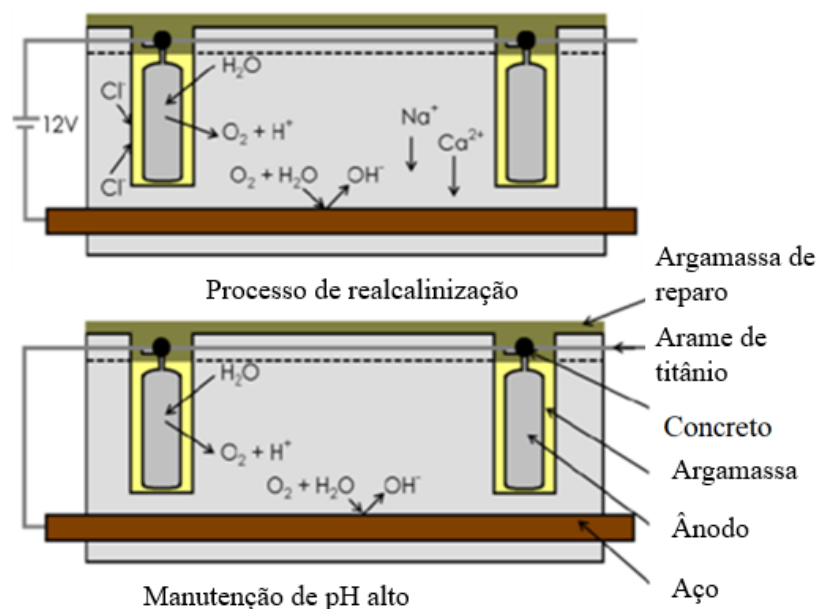


Figura 20. Sistema híbrido que funciona em duas etapas.

Além disso, também pode ser utilizado em estruturas protendidas, uma vez que a alta corrente de saída é inicialmente fornecida apenas por um período muito limitado, o que não é suficiente para promover a fragilização por hidrogênio (Dodds, 2018).

3. CONCLUSÃO

Dependendo dos requisitos da estrutura, da sua exposição, dos níveis de corrosão existentes, da extensão de vida adicional necessária e, claro, do orçamento, existem diferentes técnicas de mitigação da corrosão disponíveis no mercado.

Para proteger as estruturas contra a corrosão induzida por carbonatação, os sistemas de proteção ativos baseados em inibidores de corrosão, empregados isoladamente ou em combinação com um revestimento protetor que permite a respiração do substrato, mas evita a penetração de água líquida, são sistemas simples, de custo razoável em relação ao aumento da durabilidade que proporcionam. Para proteger as estruturas contra a corrosão induzida por cloretos, se a corrosão não estiver muito avançada e o substrato tiver a possibilidade de secar, o uso de inibidores de corrosão passivos é uma solução eficaz e duradoura.

Para evitar o deslocamento de grandes quantidades de concreto contaminado e, ao mesmo tempo, prevenir os efeitos indesejáveis do efeito “halo”, a utilização de ânodos galvânicos colocados no concreto fora da zona a reparar é uma solução possível.

Para a prevenção e controle da corrosão em concreto são, mas contaminado (especialmente contaminado com cloretos), a proteção catódica é a solução mais eficaz.

A solução com o sistema híbrido que combina correntes parasitas e correntes galvânicas é um bom compromisso entre a necessidade de supervisão permanente dos sistemas de proteção contra correntes parasitas e a simplicidade dos sistemas galvânicos.

É necessária uma estreita colaboração com todos os participantes no projeto de recuperação para garantir a seleção da técnica e dos sistemas de mitigação mais adequados, bem como a sua instalação e supervisão quando necessário.

4. REFERÊNCIAS

- Angst, U.; Moro, F.; Geiker, M.; Kessler, S.; Beushausen, H.; Andrade, C.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Imamoto, K.-ichi; von Greve-Dierfeld, S.; Serdar, M. (2020), *Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a practical review by RILEM TC 281-CC*. RILEM Technical Letters, Vol. 5, 85-100, DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, Elena., Polder, R. B. (2004), *Corrosion of steel in concrete, prevention, diagnosis, repair*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, DOI: <https://doi.org/10.1002/3527603379>
- Brem, M., Lohner, J., Büchler, M. (2022), A long-term study on the effect of a hydrophobic treatment on the moisture balance and durability of a reinforced concrete structure in a road tunnel. MATEC Web of Conferences 364, 04005, ICCRRR, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236404005>
- Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Glass, G. K., Webb, J. (2012). *Assessing the long-term durability of silanes on reinforced concrete structures* (Version 1). Loughborough University. <https://hdl.handle.net/2134/10925>
- Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Webb, J., Glass, G. K. (2013), *Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures*. Corrosion Science, Volume 69, Pages 123-129, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.032>
- Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A. (2014): *Site performance of galvanic anodes in concrete repairs*. IN: Grantham, M, etal (eds). Concrete Solutions 2014. Proceedings of Concrete Solutions, the 5th International Conference on Concrete Repair, 1st-3rd September 2014, Belfast. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 167-172, <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/16552>
- Dodds, W., Christodoulou, C. (2018), *Hybrid anode concrete corrosion protection – independent study*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 171(4), pp: 149-160, DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00024>
- Guy, T. (2000), *CEBTP, France, report No 2393.6.100*.
- Heiyantuduwa, R., Alexander, M. G., Mackechnie, J. R. (2006), *Performance of a Penetrating Corrosion Inhibitor in Concrete Affected by Carbonation-Induced Corrosion*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, Issue 6, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:6\(842\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(842))
- Holmes, S., Glass, G. K., Wilcox, G. D., Robins, P. J., Roberts, A. C. (2011), *The Response of Protective Current to Environmental Conditions During Hybrid Anode Concrete Repair Treatments*. NACE Conference Papers, 11005.
- Loziguez, E., Barthélémy, J. -F., Bouteiller, V., Desbois, T. (2018), *Contribution of Sacrificial Anode in reinforced concrete patch repair: Results of numerical simulations*. Construction and Building Materials, Volume 178, 30, Pages 405-417, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.063>
- Mozaryn, T., Kokowska, J. (2009), *Service life of coating systems applied on cooling towers - A laboratory study and in-situ investigations*. Book title: NUCPERF 2009 - Long Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management. Editor(s): V. L'Hostis, R. Gens, C. Gallé. Publisher: RILEM Publications SARL.
- Page, C. L., Treadaway, K. W. J. (1982), *Aspects of the electrochemistry of steel in concrete*, Nature, 297, 109-115, DOI: <https://doi.org/10.1038/297109a0>
- Page, C. L., Sergi, G. (2000), *Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12, Issue 1, 8-15. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:1\(8\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(8))

- Qian, S., Zhang, J., Qu, D. (2006), *Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures*, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 8, Pages 685-695, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010>
- Rodum, E., et al, (2012), The Norwegian Public Roads Administration, Trondheim, Norway, effect of different surface treatment products after 10 years of field exposure, presented at ICDC conference in June, Norway
- SAMARIS (2003-2005), *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure*, European, URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/sustainable-and-advanced-materials-road-infrastructure>
- Sergi, G., Whitmore, D. (2010), *Performance of Zinc Sacrificial Anodes For Long-term Control of Reinforcement Corrosion*. NACE - International Corrosion Conference Series.
- Silva, N. (2013), *Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete*. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy.
- Tilly, G. P., Jacobs, J. (2007) *Concrete repairs – Performance in service and current practice*. CONREPNET, ISBN 978-1-86.81-974-2.
- Tritthart, J. (2003), *Transport of a surface applied corrosion inhibitor in cement paste and in concrete*. Cement and Concrete Research, 33(6):829-834, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01067-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01067-0)
- Transportation Research Board of the National Academies (2009), *NCHRP SYNTHESIS 398, Cathodic Protection for Life Extension of Existing Reinforced Concrete Bridge Elements A Synthesis of Highway Practice*, CONCORR Inc, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.

Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade da indústria cimenteira do México

P. Angulo^{1*}, C. Ochoa¹

* Autor de Contato: tapy_angulo@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

Recebido: 06/09/2022 | Correções recebidas: 11/04/2023 | Aceito: 14/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é identificar e discutir as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir as emissões de poeiras de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, com o objetivo de melhorar a competitividade da indústria cimenteira no México. Seguiu-se um desenho de pesquisa qualitativa, observacional e dedutiva. Os resultados mostraram que os biorreatores de resíduos de SO_x têm maior ecoeficiência; seguido por cúpulas para capturar e aproveitar SiO₂ e filtros de mangas. Estas estratégias são eficazes para contaminantes específicos derivados da produção de cimento. Este estudo investiga um tema raramente abordado no México, a sustentabilidade do cimento. Ao aplicar estas estratégias, o sector do cimento mexicano aumentaria a sua competitividade empresarial.

Palavras-chave: competitividade empresarial; indicadores de competitividade; sustentabilidade; indústria de cimento.

Citar como: Angulo, P., Ochoa, C. (2023), “Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade da indústria cimenteira do México”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 254 – 270, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

¹ Fundación Universitaria Iberoamericana, Ciudad de México, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora Patricia Angulo contribuiu com a ideia original, coleta de dados e redação do artigo. O autor Carlos Ochoa contribuiu com a abordagem metodológica, a discussão dos resultados e a revisão do documento.

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 primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Sustainability strategies for greater competitiveness in the cement industry of Mexico

ABSTRACT

The objective of this research is to identify and discuss the most eco-efficient sustainable strategies to take advantage of or reduce emissions of NO_x, SO_x and SiO₂ dust in cement manufacturing, with the aim of improving competitiveness in the Mexican cement industry. The research design was qualitative, observational and deductive. The results showed that SO_x waste bioreactors have greater eco-efficiency, followed by domes to capture and use SiO₂ and baghouses. These strategies are effective for specific pollutants derived from cement production. This study explores a topic that has been scarcely addressed in Mexico, cement sustainability. By applying these strategies, the Mexican cement sector would boost its business competitiveness.

Keywords: business competitiveness; competitiveness indicators; sustainability; cement industry.

Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es identificar y discutir las estrategias sostenibles más ecoeficientes para aprovechar o reducir emisiones de NO_x, SO_x y polvos de SiO₂ en la fabricación de cemento, con el objetivo de mejorar la competitividad en la industria cementera de México. El diseño de investigación fue cualitativo, observacional y deductivo. Los resultados mostraron que los biorreactores de residuos de SO_x tienen mayor ecoeficiencia; seguido de los domos para capturar y aprovechar el SiO₂ y los filtros de mangas. Estas estrategias son efectivas para contaminantes específicos derivados de la producción de cemento. Este estudio indaga en un tema escasamente abordado en México, la sostenibilidad del cemento. Al aplicar estas estrategias, el sector cementero mexicano impulsaría su competitividad empresarial.

Palabras clave: competitividad empresarial; indicadores de competitividad; sostenibilidad; industria cementera.

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

Uma competitividade alinhada com regimes de sustentabilidade ambiental garante sucesso produtivo a toda organização empresarial, uma economia estável, a sobrevivência empresarial e permite que ela adote as transformações que as mudanças do mundo globalizado exigem. A inovação científica e o desenvolvimento tecnológico fornecem as ferramentas e os meios necessários para o desenho de melhores estratégias produtivas e ecoeficientes, bem como para tomadas de decisão mais objetivas (Jaramillo, 2017).

Este estudo tem como foco a indústria cimenteira, setor que libera grande quantidade de gases de efeito estufa e outros compostos poluentes no meio ambiente. Esta situação representa um importante desafio que deve ser resolvido para garantir a saúde das gerações futuras (León- Vélez e Guillén-Mena, 2020; Rodgers, 2018; Kumar, 2018). Nesse contexto, desenvolver a competitividade empresarial da indústria cimenteira mexicana implica analisar a viabilidade e aplicabilidade de estratégias sustentáveis e ecoeficientes no processo produtivo do cimento. O estudo dessas estratégias pode reforçar o controle de qualidade na fabricação desse material e proporcionar um melhor entendimento e domínio de questões como meio ambiente, aspectos legais, ética, gestão de custos e segurança no setor da construção. Além disso, os resultados observados em cimenteiras internacionais e algumas locais podem contribuir para melhorar o uso e a preservação dos recursos disponíveis para a indústria cimenteira mexicana.

1.1 Competitividade empresarial a partir de uma abordagem sustentável

A competitividade empresarial busca alcançar maior estabilidade, maior competitividade no mercado e produtividade baseada em processos sustentáveis, garantindo assim a vida de uma empresa no longo prazo. A adoção de estratégias produtivas mais ecoeficientes vai ao encontro das prerrogativas da Agenda 2030 para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2016 (Rivera-Hernández et al., 2018; ONU, 2018). a sustentabilidade refere-se ao uso adequado, desenvolvimento e recuperação de todos os recursos tangíveis e intangíveis, materiais e naturais que uma empresa ou organização industrial possui, permitindo assim sua estabilidade e produtividade a longo prazo (Roy, 2021). Neste ponto é importante não confundir os conceitos de sustentabilidade e sustentabilidade. A primeira trata do cuidado e uso dos recursos naturais, enquanto a segunda se refere ao desenvolvimento relacionado ao cuidado com o meio ambiente (Rivera-Hernández et al., Ruggerio, 2021).

Os ODS diretamente relacionados a um setor industrial sustentável são produção e consumo responsáveis, ação climática, preservação da vida nos ecossistemas subaquáticos e terrestres, água limpa e saneamento, bem como acesso à energia limpa. Esses ODS estão ligados ao desenvolvimento humano comunitário nos níveis local, regional e global. Além disso, convergem com a sustentabilidade ambiental de forma que promovem o desenvolvimento e a saúde comunitários ideais (ONU, 2018; Balanzátegui et al., 2019; o cimento Sustentabilidade Iniciativa ou CSI, 2019).

As evidências mostram que uma corporação industrial pode melhorar seu desenvolvimento, reputação social, imagem empresarial e gerar retornos econômicos de longo prazo quando opera em termos reais de sustentabilidade, Responsabilidade Social Corporativa (CSR) e Responsabilidade Ambiental Corporativa (RMAC); especialmente se suas ações excederem os interesses e obrigações legais (González e Cuesta, 2018). O processo geral que conduz ao desenvolvimento de uma maior competitividade empresarial em termos sustentáveis implica:

- identificar objetivos e metas adequados às características de cada organização;
- definir planos de ação estratégicos;
- gerar um sistema de indicadores que mostram as informações derivadas da atividade

empresarial

- aplicar avaliações comportamentais.

Cabe ressaltar que o desenho das estratégias e ações é diferente em cada empresa, pois depende dos resultados de um diagnóstico prévio que mostra suas deficiências, potencialidades, recursos etc. (Vega, 2017). Nessa sintonia de ideias, o reaproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima nos processos produtivos ou a inovação produtiva a partir de outras estratégias ecoeficientes são ações que fortalecem o RMAC de qualquer indústria. A experiência mostra que a sua implementação reduz os custos de produção e a emissão de gases e outros compostos poluentes (Bravo e Arroyo, 2018; Pérez et.al., 2016; Lin et al., 2017).

1.2 Indicadores de competitividade aplicáveis na indústria cimenteira

Tanto o desempenho produtivo quanto o econômico são indicadores básicos de competitividade na indústria cimenteira. Perez e outros (2013) propuseram outros indicadores potenciais que podem ser abordados desde o nível organizacional e que promovem ainda mais a competitividade empresarial neste setor, como:

- Participação no mercado mundial e boa posição internacional. Gera maior crescimento e integração do próprio mercado.
- Desenvolvimento de CSR e RMAC. Maximizar funções e melhorar a imagem corporativa.
- Competitividade de preços. Impulsiona preços atrativos para o mercado.
- Competitividade tecnológica. Aumente a produtividade oferecendo produtos diferenciados.
- Competição autêntica ou genuína. Aumenta a qualidade e a eficiência da produção aproveitando as economias de escala e a diferenciação do produto.
- Concorrência espúria. Gera um sistema de industrialização protegida, reduz a concorrência local excessiva e leva à estabilidade financeira. Além disso, permite que as empresas tenham subsídios governamentais que têm origem na desvalorização da moeda e na depressão dos salários.

Autores como López (2018) e o grupo Siemens Cities of the Future (2018) apontam que a inovação tecnológica também contribui para melhorar a eficiência produtiva e o processamento massivo de dados. Essas inovações incluem o uso de drones, sistemas informatizados e automatizados com funções em tempo real, adoção da Internet das Coisas e manutenção 4.0 e uso de materiais avançados. Da mesma forma, tecnologias com abordagem ecológica industrial minimizam a emissão de gases residuais e levam a um menor consumo de energia renovável. Por sua vez, o CSI, que reúne empresas de todo o mundo, estabelece práticas e indicadores de desempenho para o desenvolvimento sustentável em áreas como segurança, proteção do clima, emissões atmosféricas, uso de combustíveis e matérias-primas, comunicações e impactos locais na terra e comunidades. (ITSC, 2012).

Em resumo, a implementação de estratégias sustentáveis e ecoeficientes na produção de cimento é uma necessidade para a indústria mundial, pois contribuem para reduzir seus efeitos nocivos ao meio ambiente e aumentam a competitividade das empresas. Por estas razões, esta pesquisa busca identificar as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir a emissão de poeira de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, a fim de melhorar a competitividade da indústria cimenteira mexicana.

2. ABORDAGEM DO PROBLEMA

A aplicação de estratégias tecnológicas voltadas para o cuidado e preservação do meio ambiente é atualmente uma prerrogativa quase obrigatória em todo o setor produtivo empresarial, pois beneficia sobremaneira sua competitividade tecnológica e inovadora, além de sua aplicação estar alinhada com os ODS da ONU (2018).

A competitividade empresarial da indústria cimenteira se reflete não apenas em seu desempenho econômico e nível de competitividade no mercado, mas também em seus resultados na emissão de resíduos poluentes. Nesse sentido, as tecnologias adotadas para reduzir a emissão de gases de óxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e poeira de SiO_2 podem contribuir para melhorar a competitividade de seus negócios, especialmente porque é o setor industrial que polui e mais prejudica o meio ambiente.

O cimento tipo Portland, mais conhecido como "cimento cinza", é composto principalmente por um pó fino ou *clínquer* contendo compostos como silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que, quando misturados com água, pegam e endurecem à temperatura ambiente ou debaixo d'água. Os diferentes tipos de cimento variam em sua formulação dependendo do uso que será dado a eles e da resistência que se deseja obter (Sanjuán e Chinchón, 2014).

A produção industrial de cimento inclui as fases de cozedura e arrefecimento que se destacam pelas suas implicações ecológicas adversas durante a queima de combustíveis de origem natural como o carvão, coque de petróleo, óleo combustível pesado, entre outros. A transformação química que origina o *clínquer* chama-se descarbonatação e consiste na decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) a 900°C . Essa reação produz óxido de cálcio (CO) e libera quantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, o CO reage com pós de SiO_2 , com alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) e com óxido de ferro (Fe_2O_3) em altas temperaturas, formando compostos que agredem o meio ambiente como silicatos de cálcio, aluminatos e ferritas; todos os elementos formadores de *clínquer* (Sanjuán e Chinchón, 2014; Ashby, 2024).

O resfriamento do *clínquer* também tem consequências ambientais adversas (León-Velez e Guillén-Mena, 2020; Sanjuán e Chinchón, 2014), pois nesta fase são utilizados ventiladores elétricos que geram resíduos secundários de ar-energia, que são liberados a uma temperatura de 800°C . Durante o resfriamento também são emitidos gases poluentes para a atmosfera, principalmente CO, monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de enxofre (SO_2). Esses gases são liberados principalmente quando não há um mecanismo adequado para seu tratamento.

Segundo dados recentes, a indústria cimenteira consome aproximadamente 40% da energia primária do planeta. Esta percentagem deve-se à elevada utilização de petróleo, gás natural, carvão, biomassa, vento e radiação solar. Essa indústria também consome 60% da matéria-prima extraída da litosfera terrestre (silicatos, crosta e manto) e produz de 5% a 8% das emissões globais de CO_2 (León-Velez e Guillén - Mena, 2020; Rodgers, 2018).

Um estudo realizado pela Agência de Avaliação Ambiental da Holanda durante os anos de 2010 a 2017, tratou da relação entre a quantidade de cimento produzido e o total de emissões de CO_2 . seus resultados. Eles mostraram que a China é o maior produtor de cimento e, conseqüentemente, de emissões de CO_2 no mundo; atrás estão Índia, União Europeia, Estados Unidos, Vietnã, Turquia, Egito e outros países produtores (Rodgers, 2018).

Por outro lado, e de acordo com vários estudos realizados em 2020 pela Global Cement and Concrete Association (GCCA), o cimento é o material mais consumido no mundo e, conseqüentemente, o seu processo produtivo é o que gera maior emissões de CO_2 (cerca de 150 toneladas por segundo); Da mesma forma, esses estudos mostraram que um total de 14.000 milhões de m^3 de concreto é usado por ano (França 24, 2021).

Como se vê, os danos ambientais gerados pela produção massiva de cimento representam um obstáculo ao fortalecimento da competitividade empresarial desse setor, especialmente porque seus efeitos ambientais violam os ODS (ONU, 2018). Portanto, não é possível considerá-lo como um setor sustentável em termos reais.

Para além do compromisso de redução dos estragos das alterações climáticas que os líderes da indústria cimenteira têm assumido, é necessário que cada empresa aplique estratégias ecoeficientes que conduzam à transformação dos seus processos produtivos e demonstrem a redução das suas emissões poluentes, por meio de avaliações fundamentadas em evidências científicas (Rodgers,

2018).

A aplicação de modelos sistemáticos para avaliar as emissões de poluentes antes, durante e depois da aplicação de estratégias sustentáveis representa um referencial objetivo que vai além de um discurso comprometido. Na opinião de alguns especialistas, essa rota se destaca como a principal ferramenta para uma estimativa real dos possíveis cenários. Isso contribui para a tomada de decisão com base nos resultados fornecidos pelas evidências científicas, o que leva ao desenho de alternativas viáveis de solução e é orientado para melhores ações futuras (Gessa, 2016).

2.1 Contexto do problema no México

No México, a indústria cimenteira é forte, altamente produtiva e lucrativa, já que contribui com 1% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Segundo dados de 2018 do International Trade Center, essa indústria ocupou o primeiro lugar como comercializadora de cimento na América Latina; em 19º lugar como exportador mundial de cimento e em 22º lugar como importador deste produto. No entanto, dados mais recentes de 2020 revelaram que a indústria cimenteira mexicana ocupa atualmente o segundo lugar na América Latina devido à concorrência da indústria cimenteira chinesa (Clavijo e Guevara, 2020; Aguilar, 2019; Martínez e Alexandre, 2020).

Segundo a Câmara Nacional do Cimento (2020), a indústria cimenteira mexicana é composta pelas empresas Grupo Cemex, Grupos de Cemento Chihuahua (GCC), CYCNA, Cemento y Concreto Moctezuma, Holcim Cementera Cementos fortaleza e Cementos Cruz Azul. Essas empresas compõem a Câmara Nacional do Cimento (CANACEM). Segundo esta organização, o setor cimenteiro produz um total de 40 milhões de toneladas de cimento por ano e gera mais de 170.000 empregos diretos e indiretos no país. Algumas dessas empresas adotaram as seguintes estratégias para reduzir suas emissões poluentes:

- Grupo Cemex. Implementação de um modelo de sustentabilidade em suas operações que inclui infraestrutura energeticamente sustentável (Grupo Cemex, 2021).
- GCC. Promoção da responsabilidade ambiental e proteção do clima para a sustentabilidade econômica (GCC, 2023).
- Cimento e Concreto Moctezuma. Desenvolvimento de tecnologia e modernização de fábricas de cimento para reduzir impactos ambientais (Cemento y Concreto Moctezuma, s.f.).
- Blue Cross Cimentos. Algumas de suas usinas possuem sistemas de tratamento de água e sistemas de captação de águas pluviais para serem utilizadas. Eles também usam fontes alternativas de energia, especificamente biomassa obtida do nopal (Cooperativa la Cruz Azul, 2016).

Em 2020, a CANACEM informou que, para melhorar a RSE, este setor busca uma melhor gestão do coprocessamento ou incineração de resíduos sólidos urbanos de vários estados da República Mexicana, como Colima, Baja California Sur, Cidade do México, Michoacán, Nayarit, Quintana Roo e Sinaloa. Para tal, esta organização intervém através da instalação de centros de transferência, recepção, separação, trituração, compactação, compostagem e biodigestão de resíduos; também os submete a tratamento adequado e inclusão na produção industrial de cimento (Cámara Nacional del Cemento, 2020).

Mesmo com a implementação dessas medidas, não é possível afirmar que o setor cimenteiro mexicano é uma indústria sustentável, pois apresenta deficiências claras para demonstrar cientificamente a ecoeficiência de seus processos produtivos. Por exemplo, entre as empresas mexicanas, apenas a CEMEX relatou uma redução de 30% em sua pegada de carbono em seus processos produtivos, também afirmou ter reduzido o consumo de água em 10,2% nos últimos 10 anos (García-Muñoz e Pérez-Sánchez, 2020). Nesse sentido, cabe ressaltar que esses dados carecem de informações claras sobre o modelo de avaliação que os sustenta.

Embora empresas como CEMEX e Cementos Cruz Azul tenham implementado inúmeras ações

estratégicas que mostram sua intenção de se alinhar aos objetivos da agenda 2030 da ONU (García-Muñoz e Pérez-Sánchez, 2020), não há dados que comprovem plenamente seus resultados. Como pode ser visto, a indústria cimenteira mexicana precisa mostrar de forma mais sistemática a ecoeficiência na implementação de suas estratégias sustentáveis (León- Velez e Guillén-Mena, 2020).

Nesse contexto, evidências científicas internacionais e nacionais mostram que a aplicação de análises ecoeficientes permite quantificar o impacto ambiental da produção de cimento, principalmente quando se busca aproveitar a substituição de matérias-primas para economizar recursos naturais não renováveis, como combustível e água; ou, se se deseja a utilização de resíduos do processo produtivo para reduzir a emissão de gases poluentes (Pérez et.al., 2013; Sanjuán e Chinchón, 2014; Ruiz et.al., 2017).

Como mencionado anteriormente, durante o processo de produção de cimento, não apenas o CO₂ é lançado na atmosfera, mas também os gases NO_x, SO_x e poeira de SiO₂, entre outros poluentes (Kumar, 2018; SEMARNAT, sd; Cooperativa la Cruz Blue, s.f.). Os gases NO_x e SO_x reduzem a qualidade do ar e contribuem para o efeito estufa. Por outro lado, as poeiras de SiO₂ representam um risco significativo para a saúde pulmonar dos trabalhadores dentro de uma fábrica de produção de cimento.

No México não existem estudos que demonstrem cientificamente a ecoeficiência de estratégias sustentáveis aplicadas às emissões residuais de gases SO_x e NO_x e pó SiO₂ do processo de produção de cimento. Embora algumas empresas como CEMEX e Cementos Cruz Azul afirmem aplicar estratégias que parecem estar alinhadas com os ODS da Agenda 2030 da ONU. Com a presente investigação pretende-se conhecer estas estratégias que, além disso, permitem melhorar a competitividade empresarial do setor cimenteiro.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Foi utilizado um projeto de pesquisa qualitativo-observacional-dedutivo (Hernández et.al., 2014), juntamente com a aplicação de estratégias de pesquisa como busca e seleção de informações, análise documental e interpretação de dados.

A busca bibliográfica foi realizada por meio de plataformas de pesquisa científica *online* como Redalyc, Dialnet, Google Acadêmico e Scielo, utilizando palavras-chave como “gases and cement production”, “greenhouse gases”, “sustainable cement production”, “utilização de resíduos industriais”, entre outros. Cerca de 35 documentos foram selecionados a partir de artigos de revistas indexadas e acadêmicas escritas principalmente em espanhol e inglês.

A análise documental consistiu na identificação de conceitos-chave e ideias inovadoras sobre métodos e análise dos processos de interesse. A visualização de soluções viáveis para o problema levantado foi baseada na descoberta de novos dados para o contexto mexicano. Entre as principais ferramentas de análise documental utilizadas estão:

- classificação da literatura que compõe o estado da arte do problema abordado,
- preparação de tabelas de informações,
- construção de esquemas, diagramas ou mapas conceituais,
- preparação de fichas de estudo, entre outros (Hernández et.al., 2014).

A interpretação dos dados dos estudos de design qualitativo consistiu em um "isolamento de porções de discursos" (Schettini e Cortazzo, 2015), ou seja, em uma seleção particular de informações que os pesquisadores fizeram ao inferir alguns aspectos de suas pesquisas. Durante esse procedimento, não apenas a hipótese e os objetivos influenciam, mas também o mundo sociocultural, a intuição e a experiência de vida do intérprete.

4. RESULTADOS, DISCUSSÃO E PROPOSTA

4.1 Resultados

Com base na revisão bibliográfica do presente estudo, identificou-se que durante o processamento de base do cimento ocorre uma infinidade de reações químicas, como as do tipo exotérmica, assim chamadas por liberarem energia na forma de calor, luz ou som durante a formação do cimento *clínquer*. Essas reações são uma fonte de compostos residuais como nitrogênio molecular (N_2), radical amina (NH_2) e água (H_2O). A maior quantidade de emissões poluentes de SO_2 é gerada não apenas durante esta fase do processo, mas também durante a moagem, resfriamento e embalagem do produto acabado. O nível máximo permitido na emissão desse tipo de resíduo é em torno de 400 mg/m^3 , medido anualmente com o método "infravermelho não disperso NMX-AA-55-1979", conforme estipulado pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Naturais no México (SEMARNAT, s.f).

O SiO_2 faz parte da matéria-prima utilizada na produção de cimento, embora também possa ser descartado como resíduo durante esse processo e até mesmo na fase de armazenamento do cimento. O pó gerado na produção do *clínquer* é uma mistura de micropartículas de sílica + oxigênio + carbono + alumínio + cálcio. Observou-se que essa mistura afeta a saúde dos trabalhadores dentro de uma fábrica de cimento, pois inalá-la pode causar irritação nas vias respiratórias e na pele. Também pode causar sérios danos aos olhos. Esses efeitos estão relacionados ao desenvolvimento de doenças crônicas, como silicose, tuberculose, câncer de pulmão ou doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) (Kumar, 2018; Cobo e Estébanez, 2021).

Para minimizar os resíduos de NO_x , SO_x e SiO_2 durante o processamento industrial do cimento, é necessário considerar as propriedades químicas da matéria-prima utilizada, a aplicação de estratégias ecoeficientes como a substituição de combustíveis fósseis, o projeto de sistemas de captação de resíduos, o uso de nanotecnologia (Poudyal e Kushal, 2021) e outras estratégias que resultam nesse objetivo, tanto a curto, médio e longo prazo. A Tabela 1 analisa várias estratégias que foram aplicadas no México e em outros países para reduzir a emissão desses resíduos.

Tabela 1. Estratégias internacionais e nacionais para a redução de NO_x , SO_x e SiO_2 pó, derivados do processo de produção de cimento

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO_x , SO_x e SiO_2	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
Comissão Europeia, Europa, 2010	Mantenha as emissões de resíduos de SO_x baixas durante a fase de produção de <i>clínquer</i> .	Melhores Técnicas Disponíveis (MTD): 1.- Permite reduzir os gases de combustão durante o pré-aquecimento e pré-calcinação do forno, adicionando material absorvente ou depurador úmido. 2.- Otimiza os processos de	Valor médio diário de emissão obtido do SO_2 : < 50 mg/Nm^3 , quando o teor de enxofre na matéria for <0,10% mg/Nm^3 250-400 mg/Nm^3 , se o teor de enxofre for >0,25% mg/Nm^3	As margens de emissão dependem do teor de enxofre na matéria-prima utilizada, portanto, a estratégia baseia-se na seleção da matéria-prima com as menores concentrações

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
		moagem de matérias-primas para processos a seco.		desse químico.
CEMEX, México, 2012 e 2016. CSI, 2014.	Substituir os combustíveis fósseis e o gás por resíduos sólidos urbanos ou orgânicos, durante a cozedura para formação de <i>clínquer</i> .	Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos: pneus usados, resíduos de solventes, óleos usados, entre outros. Aproveitamento de resíduos orgânicos: casca de arroz, café, sedimentos de efluentes, entre outros.	A CEMEX reduziu sua pegada de carbono em 22,7% em 2012 e, em 2016, informou que obteve 26,6% de sua energia de seus fornos de biomassa e resíduos. Não foram encontrados dados sobre a ecoeficiência dessas estratégias. Também não apresentam resultados para resíduos de NO _x , SO _x e SiO ₂ .	A publicação de dados sobre a ecoeficiência dessas estratégias pode ajudar a apoiar a redução da pegada de carbono.
Rocha et al., Bolívia e Brasil, 2022.		Utilização de energia e matérias-primas alternativas com menor impacto ecológico.	85% do Clínquer era feito com combustíveis convencionais em 1990. Em 2014, esse percentual caiu para 23%.	
Sagástegui, Peru, 2012.	Captura a mistura de pós fugitivos em uma fábrica de produção de cimento.	Instalação de cúpulas coletoras de pó fugitivo. Estas cúpulas dispõem de um sistema de filtragem do ar desde o exterior que ajuda a minimizar a emissão de pó fugitivo. São instalados em depósitos temporários ou no	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficia diretamente a saúde dos trabalhadores. • Sua manutenção não tem custos excessivos. 	As micropartículas de SiO ₂ não têm efeito ambiental significativo, mas podem prejudicar a saúde de quem inala seu pó. Por esse motivo, também é recomendável que os

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
		campo de clínquer.		trabalhadores usem equipamentos de proteção especiais com máscara facial.
Sanjuán e Chinchón, Espanha, 2014	Reduzir partículas de poeira e gases poluentes emitidos por fontes localizadas.	Uso de precipitador eletrostático ou filtros de bolsa absorvedores de SO ₂ . São aplicados em estufas pelo método seco.	mg/Nm ³ são geralmente produzidas.	Tanto o precipitador quanto os filtros de mangas atuam nos pontos de carga, descarga e transporte. Eles demonstraram reduzir os gases NO _x e SO _x .
Feijoo et al., Cuba, 2016. CEI, 2012.	Faça um balanço das principais reações químicas que o enxofre sofre durante o processamento do cimento.	Sistema de monitoramento químico estequiométrico. É baseado no cálculo da massa molar do enxofre e suas reações químicas.	Ele detecta valores de referência padrão de SO ₃ e Na ₂ O, necessários para que o processamento do cimento ocorra de forma otimizada.	Este sistema permite saber quando estratégias devem ser aplicadas para evitar anéis de enxofre no forno.
Veana et al., México, 2019.	Produzir bioenergia na forma de biogás metano puro.	Biorreator que processa resíduos agroindustriais. Produz uma interação bioquímica de compostos orgânicos com teores de biometano + dióxido de carbono + vapor d'água + hidrogênio + sulfeto de hidrogênio.	Baseia-se em reações bioquímicas de bactérias quimiolitotróficas, cujo processamento garante menor emissão de gases e resíduos poluentes.	Este biorreator destaca-se pela sua dupla funcionalidade no processo de produção de cimento. Por um lado, permite processar os resíduos gerados pelo SO _x e, por outro, produz biogás metano que pode ser

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
				utilizado em substituição aos combustíveis fósseis.
Badillo et al., México, 2020.	Termovalorização na separação de resíduos para produção de fontes alternativas de combustível para o setor cimenteiro.	Termovalorização de resíduos e sua utilização. Resíduos como têxteis são processados como combustível na produção de <i>clínquer</i> .	Não apresenta especificidade para resíduos como NO _x , SO _x e SiO ₂ em pó.	Poderia favorecer uma mudança de atitude da população, pois promove a separação do lixo. Requer uma colaboração conjunta entre a população e o setor cimenteiro.
Poudyal e Kushal, Estados Unidos, 2021.	Abordagem integrada para a produção sustentável de cimento.	Captura de CO ₂ para produzir CaCO ₃ que pode ser usado como insumo.	Integração de três estratégias: captura de emissões, substituição de materiais e combustíveis e uso de nanotecnologia.	A adoção dessas estratégias pode trazer benefícios para o meio ambiente e para a sociedade.

Fonte: Elaboração própria baseada em dados coletados da Comissão Europeia (2010), CEMEX (2012), CEMEX (2016), CSI (2014), Rocha et.al. (2022), Sagástegui (2012), Sanjuán e Chinchón (2014), Feijó et al. (2016), CSI (2012), Veana et al. (2019), Badillo et al. (2020) e Poudyal e Kushal (2021).

4.2 Discussão

Ao comparar essas estratégias com outros estudos ou revisões documentais, algumas semelhanças foram encontradas. Em relação à substituição de combustíveis fósseis, a cimenteira CEMEX afirmou que 26% de seus fornos operavam com biomassa ou resíduo em 2016 (CEMEX, 2016), número que vai ao encontro do relatado por Teja et.al. (2022) que foi de 20% a 30%. De referir que é possível substituir de 3% a 80% do *clínquer* com cinza de biomassa.

Em contrapartida, Huh et.al. (2018) relataram que o maior problema para a substituição de combustíveis fósseis por biomassa é que esta continua sendo mais cara. Em seu estudo, eles compararam os lucros marginais de empresas coreanas que usam diferentes tipos de combustíveis em seus processos e descobriram que o carvão ainda é melhor do que outras fontes alternativas de energia, pelo menos em termos de custo, dificultando o uso por muitas empresas.

Guo e outros _ (2023) também realizou uma revisão documental para identificar estratégias para

reduzir o impacto ecológico da produção de cimento. Em seus resultados mostraram que alguns estão focados em melhorar a eficiência dos processos e reduzir o consumo de energia e são realizados principalmente em países asiáticos como China e Índia. Essas estratégias coincidem com a mencionada substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (Badillo et.al., 2020, CEMEX, 2016) e com aquelas que contribuem para manter níveis adequados de emissões poluentes, como o sistema de monitoramento químico ou filtros de ar (Figura 1 e Figura 2).

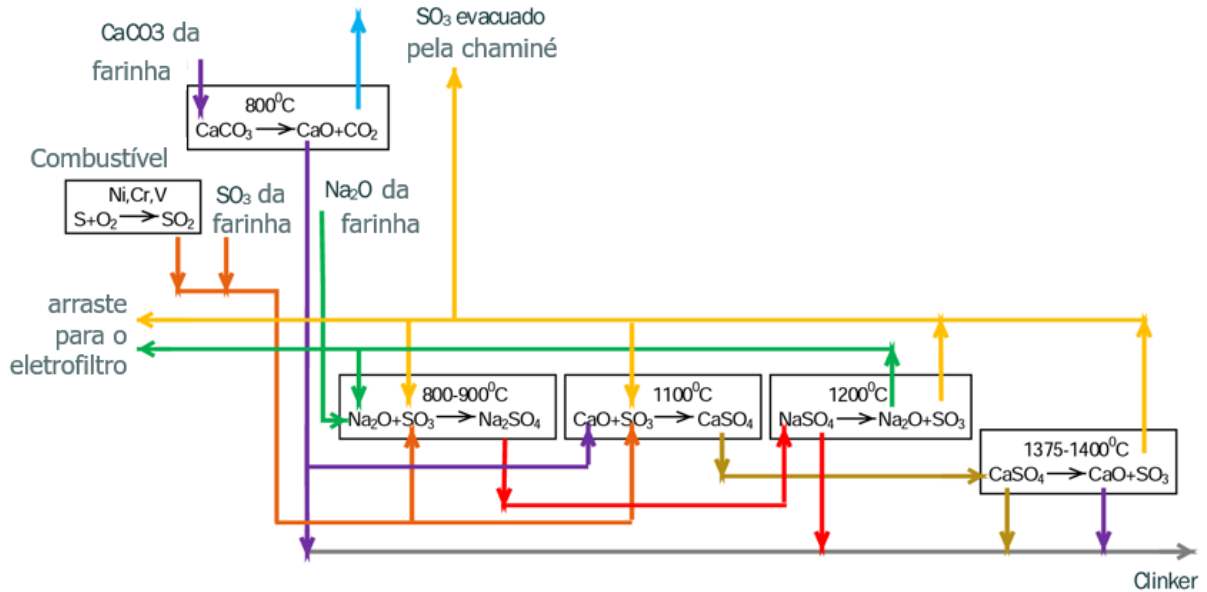


Figura 1. Sistema de monitoramento químico estequiométrico. Fonte: Feijó et.al. (2016).

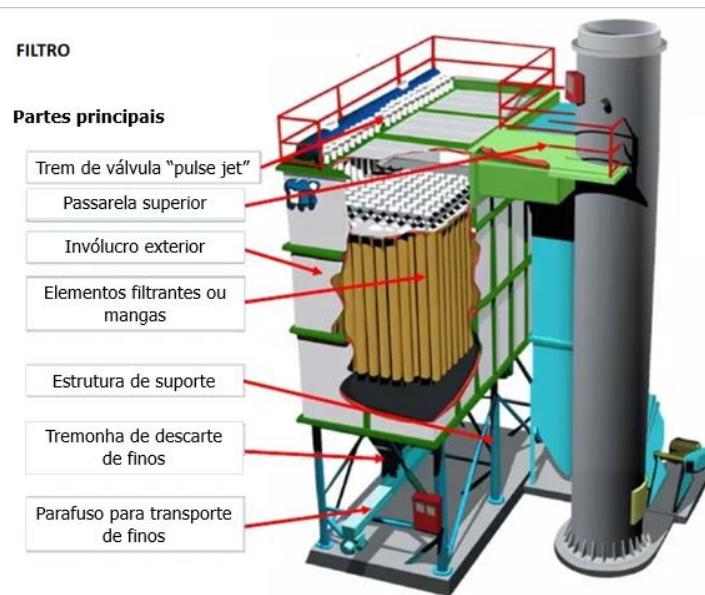


Figura 2. Filtro de mangas utilizado na indústria cimenteira. Fonte: Camargo (s. f.).

Outro tipo de estratégias relatadas por Guo et al. (2023) estão relacionados ao desenvolvimento de tecnologias para capturar, usar e armazenar emissões de carbono, cuja implementação ocorre principalmente em países europeus. Este estudo encontrou estratégias desse tipo adotadas no México e em outros países de língua espanhola, como cúpulas para capturar SiO₂ (Sagástegui, 2012) ou a transformação de resíduos de SO_x em biorreatores por meio de processos de oxidação de enxofre (Figura 3).

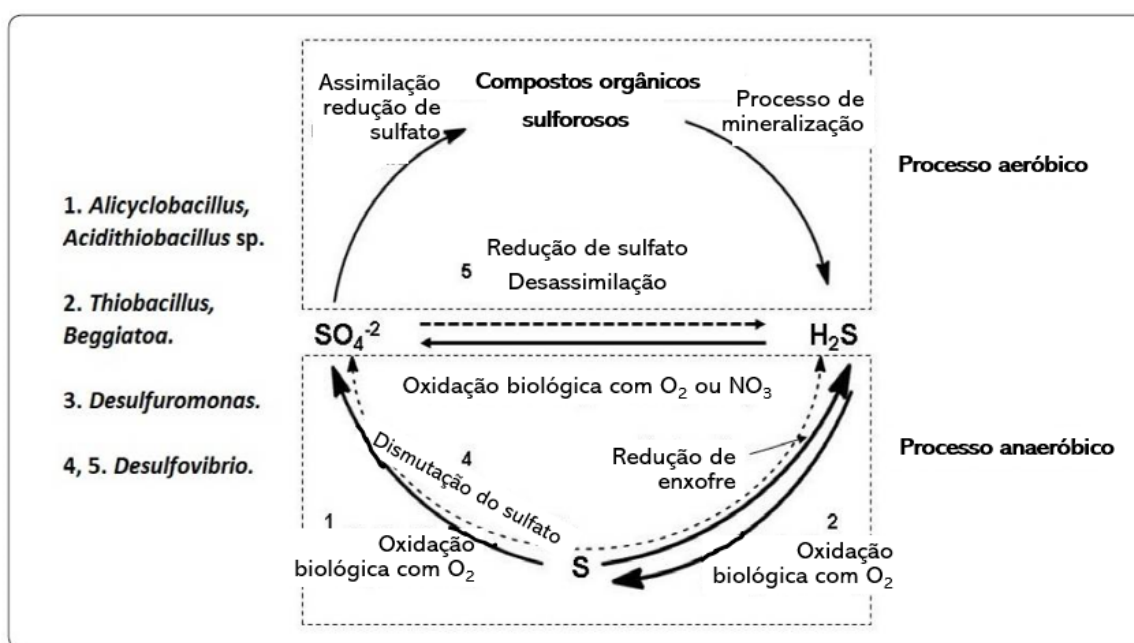


Figura 3. Exemplo do ciclo gerado em um biorreator. Fonte: Veana et.al. (2020).

4.3 Proposta

Para visualizar a prioridade e importância das estratégias sustentáveis analisadas, na Figura 4 elas são ordenadas de acordo com sua viabilidade de aplicação no setor industrial de cimento no México. As opções localizadas no topo da pirâmide apresentaram maior ecoeficiência e benefícios, de acordo com as evidências científicas que as sustentam.

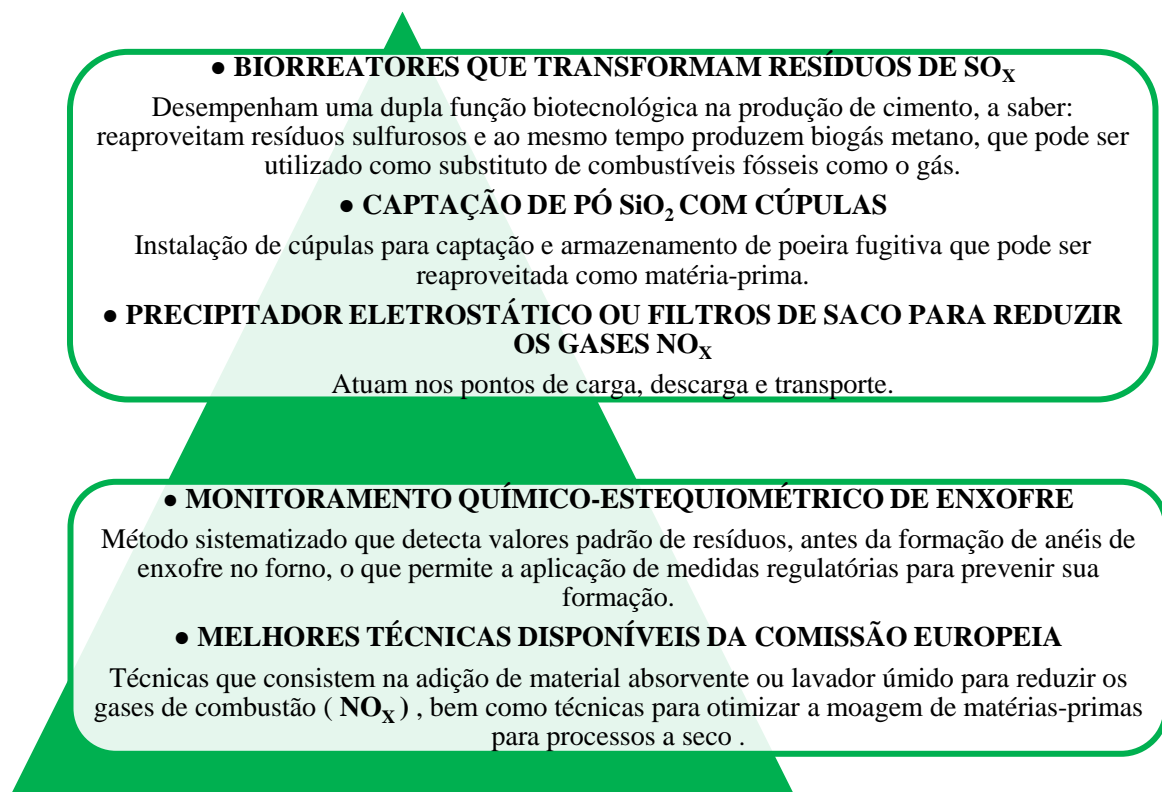


Figura 4. Diagrama hierárquico de estratégias ecoeficientes que comprovadamente minimizam a emissão de resíduos NO_x, SO_x e pó de SiO₂ durante a produção de cimento.

5. CONCLUSÕES

Os biorreatores SO_x apresentam maior ecoeficiência porque reaproveitam resíduos de enxofre e produzem biogás metano que serve como combustível, os domos captam o pó de SiO_2 que pode ser reaproveitado como matéria-prima e os filtros de mangas comprovadamente reduzem a emissão de resíduos de gases NO_x . A adoção dessas estratégias permitiria ao setor cimenteiro mexicano comprovar com evidências científicas a ecoeficiência de seus processos produtivos. Até a redação deste artigo, apenas a CEMEX e a Cementos Cruz Azul adotaram estratégias como a substituição de fontes de energia fóssil por biomassa ou resíduos, mas não se referem à aplicação de outras estratégias de mitigação de emissão de poluentes consideradas nesta proposta.

Da mesma forma, as cimenteiras mexicanas obteriam valor agregado em seus processos de produção e cimento acabado quando seguissem processos ecoeficientes. Tudo isso contribuiria para fortalecer a competitividade de seus negócios, cujos benefícios vão além da simples obtenção das certificações ambientais exigidas por lei.

Também é preciso redobrar esforços para analisar com mais profundidade se as estratégias que as cimenteiras vêm adotando no México são realmente sustentáveis e alinhadas com os ODS da ONU. Mais uma vez, a CEMEX e a Cementos Cruz Azul são as únicas cimenteiras que parecem estar alinhadas com esses objetivos por meio de suas estratégias de substituição de combustíveis fósseis. As demais cimenteiras mexicanas expressam seu compromisso com o desenvolvimento sustentável, mas não apresentam estratégias ou indicadores para reduzir seu impacto ambiental.

Por fim, sugere-se a implementação de melhores métodos para avaliar os resultados antes, durante e após a aplicação de estratégias sustentáveis neste setor, pois isso proporcionaria maior certeza sobre sua ecoeficiência. Reitera-se que o grande desafio a ser enfrentado por este setor é que os métodos sustentáveis que aplica comprovem, com base em evidências científicas, sua ecoeficiência.

6. REFERÊNCIAS

- Aguilar, J. D. (2019), *Cemento, el oro gris mexicano*. Consultado el 23 de marzo de 2023. <https://www.milenio.com/especiales/cemento-el-oro-gris-mexicano>
- Ashby, M. F. (2024), “*Materials and Sustainable Development*”. Elsevier, España, pp. 377–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98361-7.00016-6>
- Badillo, M. M., Martínez, L. A., Flores, J. R., y Flores, J. I. (2020), “*La termovaloración de combustibles alternativos y materias primas (AFR) en hornos para la producción de cemento Portland: una opción sostenible*”. *Academia Journals*, Hidalgo, México.
- Balanzátegui, R. I., Coba, L. M. y Vega, J. G. (2019), *Desarrollo sostenible de proyectos productivos sobre la base de la ley de Economía Popular Solidaria*. *Revista Espacios*. 40(22): 4-21.
- Bravo, D. N. y Arroyo, F. R. (2018), *Innovación sustentable: un camino al desarrollo productivo del Ecuador*. *Innova Research Journal*. 3(5): 29-44. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n5.2018.512>
- Cámara Nacional del Cemento (2020), *Co-procesamiento en la industria del cemento: Alternativa de manejo de residuos ambientalmente segura*. Consultado el 24 de marzo de 2023. https://comisiones.senado.gob.mx/ambiente/reu/docs/presentacion4_e121020.pdf
- Camargo, G. (s. f.), *Filtro de Mangas Partes y Funcionamiento*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://es.scribd.com/document/439978098/Filtro-de-Mangas-Partes-y-Funcionamiento#>
- Cemento y Concreto Moctezuma (s. f.), *Compromiso por contribuir al desarrollo social*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cmoctezuma.com.mx/desarrollo-sostenible>

- CEMEX (2016), “*La contribución de CEMEX hacia un futuro bajo en carbono. Postura de CEMEX respecto al cambio climático*”. CEMEX, México.
- CEMEX. (2012), “*Construyendo las ciudades del futuro. Informe de desarrollo sustentable*”. CEMEX, México.
- Ciudades del Futuro (2018), *Cemento 4.0: la disrupción tecnológica llega a la industria cementera*. Siemens. Consultado el 20 de marzo de 2023. <https://ciudadesdelfuturo.es/cemento-4-0-la-disrupcion-tecnologica-llega-la-industria-cementera.php>
- Clavijo, P. A. y Guevara, M. M. (2019), “*Análisis Sostenible de la Cementera Holcim con Repercusiones de Mercadeo y Finanzas*”, Trabajo de Grado, Universidad del Rosario, Bogotá.
- Cobo, M. E. y Estébanez, S. (2021), “*Guía para el control de la exposición a polvo de sílice*”. Asepeyo prevención, Madrid, España.
- Comisión Europea (2017), “*Prevención y control integrados de la contaminación. Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio*”. Observatorio de la economía circular en la industria cementera, Sevilla, España.
- Cooperativa la Cruz Azul (2016), *La Cruz Azul y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.aciamericas.coop/IMG/pdf/apolinarortiz.pdf>
- Cooperativa La Cruz Azul (s. f.), *Medición isocinética a fuentes fijas y perimetral de partículas*. Consultado el 18 de marzo de 2023. <https://acortar.link/MpNMyg>
- Feijoó, J. A., Fabelo, J. A. y Rodríguez, I. L. (2017), *Evaluación del ciclo del azufre en el horno de la fábrica de cemento de Cienfuegos*. Revista Centro Azúcar. 44(2): 1-9.
- France 24 (2021), *El hormigón, tercer emisor mundial de gases de efecto invernadero*. Consultado el 21 de marzo de 2023. <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero>
- García-Muñoz, A. C. y Pérez-Sánchez, B. (2020), *La responsabilidad social en CEMEX*. Investigación Valdizana. 14(4): 175–87. <https://doi.org/10.33554/riv.14.4.728>
- Gessa, P. A. y Sancha, D. M. P. (2016), *Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación*. Innovar. 26(60): 51–66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>
- González, M. J. y Cuesta, V. P. (2018), *De responsabilidad social a sostenibilidad corporativa: una revisión actualizada*. Revista Internacional de Investigación en Comunicación. 17(7): 46-71. <https://doi.org/10.7263/adresic-017-04>
- Grupo Cemex (2021), *Sostenibilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cemexmexico.com/sostenibilidad>
- Grupos de Cemento Chihuahua (2023), *Sustentabilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.gcc.com/es/sustentabilidad/#:~:text=La%20estrategia%20de%20sustentabilidad%20de,para%20esta%20y%20pr%C3%B3ximas%20generaciones>.
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P. y Zhu, T. (2024), *A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry*. Journal of Environmental Sciences. 136: 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014), “*Metodología de la investigación*”. Mc Graw Hill Education, Distrito Federal, México.
- Huh, S.Y., Lee, H., Shin, J., Lee, D. y Jang, J. (2018), *Inter-fuel substitution path analysis of the korea cement industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82: 4091–4099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.065>
- Jaramillo, R. A. (2017), *Una Mirada a la competitividad*. Dictamen libre. 20:87-98.
- Kumar, C. A. (2018), “*Cement production technology. Principles and Practice*”. CRC Press, Florida, Estados Unidos.

- León-Velez, A. y Guillén-Mena, V. (2020), *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. Ambiente Construido. 20(3): 611-25. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- Lin, K.-L., Lo, K.-W., Hung, M.-J., Cheng, T.-W., y Chang, Y.-M. (2017), *Recycling of spent catalyst and waste sludge from industry to substitute raw materials in the preparation of Portland cement clinker*. Sustainable Environment Research, 27(5). <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.05.001>
- López, N. V. (2018), *El papel de la innovación tecnológica industrial y la sustentabilidad. Un acercamiento a la industria cementera*. Tekhné Revista de la Facultad de Ingeniería. 21(2): 83-95.
- Martínez, L. M. y Alexandre, P. M. (2020), *Industria cementera en México: Sin señales de recuperación a pesar de tocar fondo el año pasado*. Consultado el 24 de febrero de 2022. <https://www.spglobal.com/assets/documents/ratings/es/2020-01-22-industria-cementera-mexico.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018), *“La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe”*. ONU-CEPAL, Santiago de Chile, Chile.
- Pérez, E. M. J., Espinoza, C. C. y Peralta, M. B. (2016), *La responsabilidad social empresarial y su enfoque ambiental: una visión sostenible a futuro*. Revista Universidad y Sociedad. 8(3): 169-78.
- Pérez, S. B., Guzmán, S. A., Mayo, C. A. y Heredia, R. H. (2013), *Evolución histórica de cementos mexicanos: un grupo económico de capital nacional*. Hitos de Ciencias Económico Administrativas. 19(55): 115-30. <https://doi.org/10.19136/hitos.a0n55.113>
- Poudyal, L. y Adhikari, K. (2021), *Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production*. Resources, Environment and Sustainability. 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>
- Rivera-Hernández, J. E., Alcántara-Salinas, G., Blanco-Orozco, N., et.al. (2017), *¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto*. Revista Posgrado y Sociedad. 15(1): 57-67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D. y Cayo-Chileno, N. G. (2022), *Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review*. Materials Today: Proceedings. 57, 436–439. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565>
- Rodgers, L. (2018), *La enorme Fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. Consultado el 17 de marzo de 2023. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Roy, M. (2021), *“Sustainable Development Strategies”*. Elsevier, España, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818920-7.00005-0>
- Ruiz, Y., Domínguez, E. R., Sánchez, S., Castillo, L., Martirena, J. F. y Suppen, N. (2017), *Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clínker*. Revista Centro Azúcar. 44: 77–88.
- Ruggerio, C. A. (2021), *Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions*. Science of The Total Environment, 786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sagástegui, D. A. (2012), *“Propuesta para reducir las emisiones de polvo fugitivo en el proceso productivo de una empresa cementera”*, Tesis de ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Santiago de Surco, Perú.
- Sanjuán, M. A. y Chinchón, S. (2014), *“Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland”*. Universidad de Alicante, España.
- Schenttini, P. y Cortazzo, I. (2015), *“Análisis de datos cualitativos en la investigación social. Procedimientos y herramientas para la interpretación de información cualitativa”*. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.), “*Guía para la elaboración de la cédula de operación anual. Industria del cemento, cal y yeso*”. SEMARNAT, México.
- Teja, R., Hiremath, R.B, Rajesh, P., Kumar, B., y Renukappa, S. (2022), *Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112503>
- The Cement Sustainability Initiative (2012), “*The Cement Sustainability Initiative*”. World Business Council for Sustainable Development, Washington, DC, Estados Unidos.
- The Cement Sustainability Initiative (2014), “*Cement Industry Energy and CO2 Performance Getting the Numbers Right (GNR)*”. World Business Council for Sustainable Development.
- The Cement Sustainability Initiative (2019), “*Indian Cement Sector SDG Roadmap*”. World Business Council for Sustainable Development, Ginebra, Suiza.
- Veana, F., González-Purata, P. Y., Wong-Paz, J. E., Aguilar-Zárate, P., Muñoz-Márquez, D. B. (2019), *Tendencias de la bioenergía: del metagenoma de hábitats ricos en azufre a la purificación del biogás*. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 22: 1-11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.190>
- Vega, L. A. (2017), *Sustentabilidad y competitividad en empresas hortícolas de México*. Sapientiae. 2(2): 110-26.