

Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção

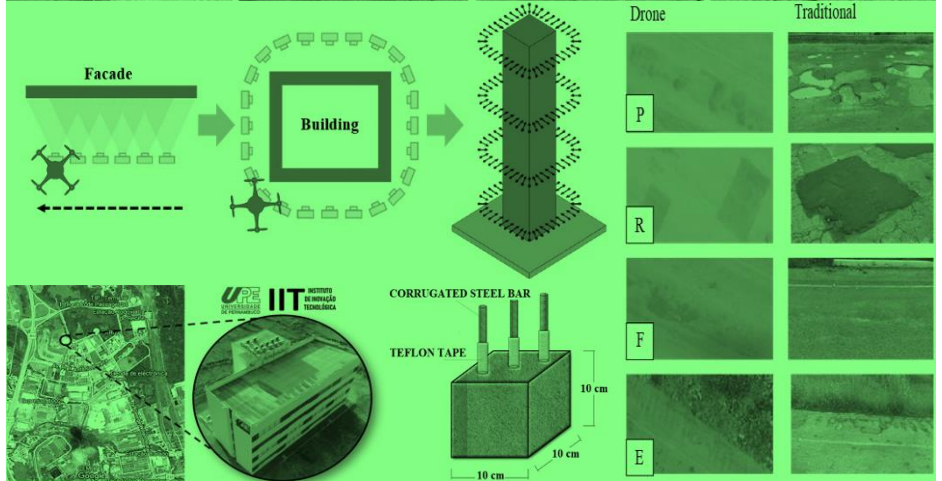
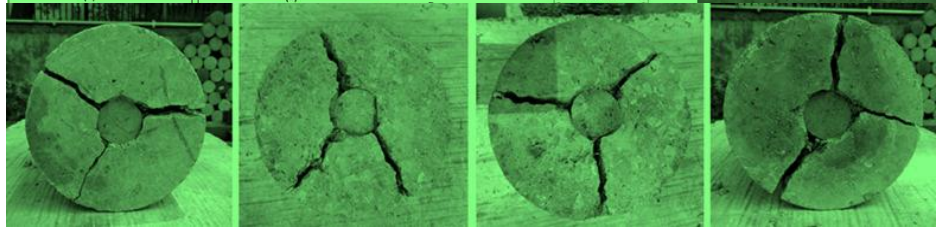
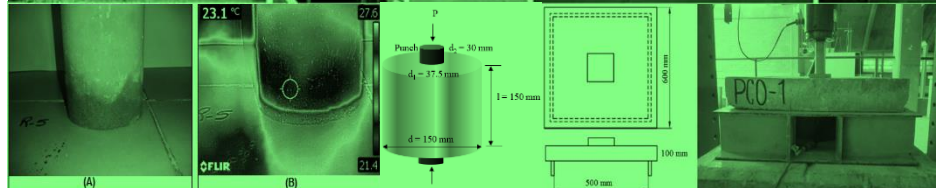
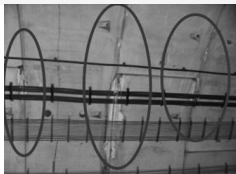
DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1>
editorial.revista.alconpat@gmail.com

eISSN: 2007-6835

Volume 11

Janeiro – Abril 2021

Número 1



Revista Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção

<http://www.revistaalconpat.org>



ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

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

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Presidente

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Iván Escalante García, **México**

Vicepresidente Técnico

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Vicepresidente Administrativo Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

Gestor

Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

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

Co-Editor en Jefe:

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

Editor Ejecutivo:

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

Editores Asociados:

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

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dr. Mauricio López.

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

Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidad Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –

INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

RAV11N1, janeiro - abril 2021

Mensagem do Editor in Chief

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

<http://www.revistaalconpat.org>

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

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

Esta edição do V11N1 começa com um trabalho do **Brasil**, onde Hygor Thairony Parreira Vilela e colegas avaliam a eficácia do uso de diferentes níveis de aditivo de cristalização para prevenir a reação álcali-agregado em argamassas. A análise foi realizada por meio de ensaios de expansão de barras de argamassa pelo método acelerado, em paralelo aos ensaios de resistência mecânica, capilaridade, porosidade e porcentagem de vazios. Observou-se que a presença de produtos alcalinos na composição aditiva aumentou significativamente as expansões iniciais na primeira semana. Em relação aos resultados de resistência mecânica, absorção de água e vazios, o produto foi satisfatório, melhorando as propriedades das argamassas. Em geral, os resultados atestam a eficácia do aditivo na vedação de vazios e poros, mas não na inibição da reação álcali-agregado.

No segundo trabalho, Alejandro Flores-Nicolás e colegas do **México** avaliam o efeito da corrosão no concreto armado sem e com a adição de pó de grafite de baixo carbono. Os processos de identificação de fases e as propriedades físico-eletrônicas do concreto foram analisados por meio de técnicas de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), potencial de meia-célula, ruído eletroquímico (EN) e resistência à polarização. linear (RPL). As amostras foram estudadas por 168 dias em solução salina. Os resultados mostram que ao adicionar pó de grafite na quantidade de 2,5% em peso do cimento, a resistência à compressão foi aumentada em comparação com a amostra controle. Testes eletroquímicos mostram que a corrosão da armadura de aço no concreto aumentou conforme o nível de substituição do grafite aumentou.

O terceiro artigo vem do **Brasil**, onde Renata dos Santos Kimick e colegas analisam comparativamente os sistemas de impermeabilização usados no mercado brasileiro. Os produtos avaliados foram: emulsão asfáltica, resina acrílica e resina termoplástica. Para avaliar a eficácia dos sistemas foram realizados testes de estanqueidade, absorção por imersão e capilaridade, sendo este último analisado também por imagens termográficas. Para a análise da eficiência dos sistemas, foi adotado um padrão de envelhecimento acelerado, que consistia na alternância das amostras nos ciclos úmido e seco. Os resultados indicam um bom

desempenho dos sistemas estudados, que em comparação com a série não impermeável apresentaram absorbâncias menores (aproximadamente 300%). O teste de envelhecimento acelerado indicou, a partir dos 140 dias de idade, uma redução no desempenho da série impermeabilizada.

No quarto artigo da **Espanha**, Pedro Garcés Terradillos e colegas estudaram a viabilidade de um tratamento combinado de extração de cloreto eletroquímico (CEE) e proteção catódica (PC) em estruturas de concreto armado usando uma pasta condutora de cimento-grafite como ânodo. Está comprovado que a aplicação prévia de um tratamento eletroquímico de extração de cloreto leva a uma maior durabilidade do ânodo. Foi demonstrado que, para estruturas de concreto armado localizadas em ambientes marinhos agressivos, a combinação de tratamentos eletroquímicos, primeiro EEC para reduzir o teor de cloretos e depois PC para manter as condições de passivação, é capaz de fornecer condições de proteção adequadas aos armadura, desde que seja aplicado o valor de densidade de corrente adequado, de acordo com o teor médio de cloretos presente nas estruturas de betão armado.

O quinto artigo, de Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes e colegas, vem do **Brasil**; eles estudam a viabilidade do uso de drones para mapear e fiscalizar as manifestações patológicas em pavimentos asfálticos em comparação com o método tradicional. Parcelas amostrais foram estabelecidas a cada 20 m, 6 m de extensão, totalizando 20 estações, que tiveram suas manifestações patológicas anotadas e o Índice de Gravidade Global calculado para a área de estudo. Os resultados obtidos com as metodologias de referência e alternativas foram comparados com base nas patologias identificadas e no tempo despendido nos inquéritos. Os resultados demonstraram a viabilidade do uso de Drones na fiscalização de patologias de pavimentos asfálticos, com base na Norma DNIT 006/2003 - PRO, obtendo resultados semelhantes à metodologia tradicional com redução significativa do tempo de operação (33,3%).

O sexto trabalho desta edição é da autoria de Carlos Aire e L. Aguilar do **México**, eles avaliam três testes para caracterizar o comportamento da injeção de concreto com fibras metálicas no revestimento primário do túnel da linha 12 do metrô CDMX. Três painéis quadrados (UNE 14488-5), três painéis redondos (ASTM C1550) e quatro cilindros para teste de Barcelona (UNE 83515) foram feitos. Todos podem ser utilizados como métodos de controle de qualidade para concretos reforçados com fibras (CRF) em construções subterrâneas, porém, foi encontrada maior variabilidade nos resultados dos painéis circulares, além de serem os corpos-de-prova com maior complexidade para sua elaboração e teste. Portanto, a aplicação do teste de Barcelona é recomendada para o controle de qualidade no local, pois é mais fácil preparar, manusear e executar a amostragem e o teste.

No sétimo trabalho, do **Brasil**, Ramiro Daniel Ballesteros Ruiz e colegas avaliam o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) como ferramenta visual para a inspeção de manifestações patológicas em fachadas por meio de um estudo exploratório. Atualmente, os VANTs ganham cada vez mais importância na construção civil como novo mecanismo de obtenção de dados e inspeção visual,

otimizando o tempo. A estratégia de pesquisa considera três etapas distintas: a revisão bibliográfica, o procedimento experimental e, por fim, o processamento dos dados, com o objetivo de verificar a viabilidade do procedimento de inspeção. A praticidade do uso do VANT é evidente, principalmente onde o acesso é difícil, o que pode reduzir tempo, custos e gerar maior segurança, além da reconstrução 3D do prédio a ser fiscalizado e gerar diagnósticos mais precisos.

No oitavo artigo, da **Espanha**, Vicente Alegre e S. Villalba discutem o exemplo de um caso real em que, em um túnel existente, é construído um edifício com instrumentação de fibra ótica que permite o monitoramento do histórico de carregamento de uma estrutura desde a sua instalação. Para verificar se o túnel não é afetado estruturalmente durante o período de construção, trechos do túnel são instrumentados e as microdeformações ocorridas são medidas, as quais são comparadas com as do modelo. As ovalizações e tensões na abóbada foram apreciadas ao longo das diferentes fases do processo de construção, estando todas abaixo dos valores limites estabelecidos no plano de contingência. Esta técnica permitiu validar os trabalhos realizados ao longo do processo.

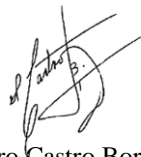
A matéria que fecha a edição é de Willians Perley Alexandre da Silva e colegas do **Brasil**, que apresentam o uso da câmera termográfica integrada no VANT nos processos de fiscalização predial. O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em uma revisão sistemática de artigos e trabalhos relacionados ao tema, investigando as características e funcionamento das câmeras termográficas, o uso de VANTs e os fatores que influenciam na detecção das manifestações patológicas. Os resultados permitiram identificar as vantagens e limitações da integração de câmeras e UAV, demonstrando a viabilidade e eficácia do uso conjunto. Como contribuição, este trabalho proporcionou o desenvolvimento de um protocolo de voo que ordena as etapas e procedimentos necessários para realizar uma inspeção utilizando a câmera térmica integrada no VANT.

Estamos confiantes 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 deste número pela disponibilidade e esforço em apresentar artigos de qualidade e cumprir os prazos estabelecidos.

Há exatos 10 anos, em janeiro de 2011, estávamos lançando o primeiro número da Revista Alconpat (RAVIN1). Dentro de 10 anos, devo dar um amplo reconhecimento à equipe editorial original e àqueles que aderiram a esta iniciativa que nos trouxe até onde estamos agora. Mas, sem dúvida, o maior reconhecimento é merecido pelos autores de nossos artigos, que confiaram em nossa revista e investiram tempo, dinheiro e esforço para publicar seus trabalhos de pesquisa conosco, apesar de muitos deles terem tido melhores opções em seus momentos. Por fim, nossos leitores, sem eles não somos ninguém, um agradecimento especial por nos ler, baixar e citar. Sua preferência sem dúvida nos dará, em um curto espaço de tempo, a oportunidade de continuarmos melhorando por meio de melhores ferramentas de consulta e indexação. Muito, muito obrigado a todos. Durante o ano de

2021 celebraremos estes 10 anos com algumas atividades de celebração acadêmica que daremos a conhecer a cada edição.

Em nome do Conselho Editorial



Pedro Castro Borges

Editor in Chief



CONTENIDO

PESQUISA BÁSICA

Vilela, H. T. P., Teixeira Filho, M. G., Campos Neto, T. F.: Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas.

Página

1 - 17

Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Uruchurtu-Chavarín, J.: Efeito na corrosão do concreto reforçado com adição de pó de grafite e sua avaliação nas propriedades físico-electroquímicas.

18 – 33

PESQUISA APLICADA

Knick, R. S., Gazolla, M. G., da Silva Junior, R. M., Capraro, A. P. B., Moreira, K. A. W.: Análise comparativa da eficácia e eficiência de três sistemas impermeabilizantes.

34 – 47

Garcés Terradillos, P., Climent, M. A., Carmona, J., Sánchez de Rojas, M. J.: Extensão da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos através da aplicação de técnicas eletroquímicas.

48 – 60

Vasconcelos Fernandes, R. T., Fonseca Cabral, A., Batista Dantas, G. C., Varela Tinoco, V. N., Azevedo da Silveira, B. D., Sousa Junior, A. M.: Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones.

61 – 72

Aire, C., Aguilar, L.: Ensaios de controle de concreto projetado com fibra no túnel da linha 12 do metrô CDMX.

73 – 87

Silva, Ruiz, R. D. B., Lordsleem Júnior, A. C., Rocha, J. H. A.: Inspeção de fachadas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT): estudo exploratório.

88 – 104

CASO DE ESTUDIO

Alegre, V., Villalba, S.: Avanços na instrumentação de estruturas com fibra ótica. O presente de uma instrumentação com futuro.

105 – 122

PESQUISA DOCUMENTAL

Silva, W. P. A., Lordsleem Júnior, A. C., Ruiz, R. D. B., Rocha, J. H. A.: Inspeção de manifestações patológicas em edifícios utilizando câmera termográfica integrada ao Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): uma pesquisa documental.

123 – 139

Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas

H. T. P. Vilela^{1*} , M. G. Teixeira Filho¹ , T. F. Campos Neto² 

* Autor de Contato: hygorencivil@outlook.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.461>

Recepção: 18/03/2020 | Aceitação: 23/10/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

Este artigo tem como objetivo avaliar a eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas. A análise foi realizada por meio de ensaios de expansão de barras de argamassa pelo método acelerado em paralelo com ensaios de desempenho mecânico, capilaridade, porosidade e índice de vazios. Observou-se que a presença de produtos alcalinos na composição do aditivo aumentou significativamente as expansões iniciais dentro da primeira semana. No que se refere aos resultados de desempenho mecânico, absorção de água e vazios, o produto se mostrou satisfatório, melhorando as propriedades das argamassas. De modo geral, os resultados atestam a eficácia do aditivo na selagem de vazios e poros, mas não na inibição da reação álcali-agregado.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; aditivo cristalizante; argamassas.

Citar como: Vilela, H. T. P., Teixeira Filho, M. G., Campos Neto, T. F. (2021), "*Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 1 – 17, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.461>

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde (UniRV), Rio Verde – GO, Brasil.

² Professor Mestre, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde (UniRV), Rio Verde – GO, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor H. T. P. Vilela contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão, redação e preparação do texto original; M. G. Teixeira Filho contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão; T. F. Campos Neto contribuiu com a conceituação, supervisão, discussão dos resultados, redação e revisão.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Effects of the use of crystalline admixtures on alkali-aggregate reaction and water absorption of mortars

ABSTRACT

This article aims to evaluate the effectiveness of different contents of crystalline admixture in preventing the alkali-aggregate reaction in mortars. The analysis was carried out by means of accelerated expansion tests method of mortars in parallel with tests of mechanical strength, capillarity, porosity and void ratio. It was observed that the presence of alkaline products in the composition of the admixture significantly increased the initial expansions within the first week. Regarding the results of mechanical strength, water absorption and voids, the product was satisfactory improving the properties of the mortars. In general, the results attest to the effectiveness of the admixture in sealing voids and pores but not in inhibiting the alkali-aggregate reaction.

Keywords: alkali-aggregate reaction; crystallizing additive; mortars.

Efectos del uso de aditivos cristalizantes en la reacción de álcali-agregado y la absorción de morteros

RESUMEN

El artículo tiene como objetivo evaluar la efectividad del uso de diferentes niveles de aditivo cristalizante para prevenir la reacción álcali-agregado en morteros. El análisis se realizó mediante ensayos de expansión de barras de mortero por el método acelerado en paralelo con ensayos de resistencia mecánica, capilaridad, porosidad y porcentaje de vacíos. Se observó que la presencia de productos alcalinos en la composición del aditivo aumentó significativamente las expansiones iniciales dentro de la primera semana. En lo que se refiere a los resultados de resistencia mecánica, absorción de agua y vacíos, el producto fue satisfactorio, mejorando las propiedades de los morteros. En general, los resultados dan fe de la eficacia del aditivo para sellar vacíos y poros, pero no para inhibir la reacción álcali-agregado.

Palabras clave: reacción álcali-agregado; aditivo cristalizante; morteros.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, importantes avanços nos estudos de durabilidade dos materiais de construção têm sido realizados. Tais estudos permitem identificar o padrão de comportamento dos materiais perante sua interação com meio onde estão inseridos, além de determinar outros aspectos fundamentais, como o cumprimento da vida útil dos projetos e das edificações.

Os concretos e argamassas se configuram como os materiais mais utilizados na indústria da construção e, dentre seus vários tipos de degradação, pode-se elencar a reação álcali-agregado (RAA). De modo geral, esta é uma manifestação patológica relacionada às propriedades mineralógicas e químico-físicas, cujo resultado da combinação dessas três categorias é um efeito expansivo prejudicial. Trata-se de um fenômeno de alto grau de complexidade, sendo essencial evitar a sua ocorrência (Junior e Ferro, 2016).

A RAA é um dos fenômenos patológicos que mais agridem estruturas de composição cimentícia e um dos mais relevantes quando o assunto se volta para a durabilidade. Em síntese, pode ser definida como reações químicas entre alguns componentes do agregado com os hidróxidos alcalinos presentes dentro dos poros da matriz cimentícia. Essas reações não possuem tempo preestabelecido para seu surgimento, haja vista que estão vinculadas a diversos fatores, como quantidade de álcalis na matriz suscetíveis à reação; temperatura e umidade ambiente; reatividade do agregado; e, por fim, natureza do material, conforme Figura 1 (Silva, 2007).



Figura 1. Fatores condicionantes do fenômeno (Couto, 2008).

Definições mais precisas podem ser feitas por meio da distinção dos diferentes tipos de RAA. A reação álcali-carbonato (RAC) é proveniente da reação dos hidróxidos alcalinos do cimento Portland ou outras fontes e agregados constituídos de rochas calcárias dolomíticas argilosas. Ao passo que, a reação álcali-sílica (RAS) se funda na reação dos produtos de hidratação do cimento Portland e agregados com matéria siliciosa em sua composição (ABNT NBR 15577-1, 2018). Para esta pesquisa, a RAS foi abordada como RAA de modo geral.

O cimento possui uma boa influência na ocorrência dessa manifestação, pois, quando hidratado, libera na matriz álcalis que ficam acessíveis através dos poros. A RAA pode ocorrer também, devido a minerais alcalinos dos agregados, de pozolanas presentes na composição do cimento e até mesmo produtos presentes na água utilizada (Rolim, 2010).

Outro fator de grande influência é a umidade que, por sua vez, pode estar relacionada a duas funções nas reações deletérias, sendo: ionizando e transportando íons alcalinos e hidroxila ao longo dos poros da matriz cimentícia; e podendo ser absorvida por produtos da própria RAA. Desse modo, o gel de silício alcalino se expande na presença da água, o que pode levar ao surgimento de fissuras. Portanto, para componentes de edificações que estão em contato frequente com umidade exige-se maior cuidado de prevenção da RAA (Couto, 2008).

Sabe-se que a porosidade dos concretos e argamassas é um fator determinante da resistência química do material. Aditivos cristalizantes, também chamados de cicatrizantes, são amplamente utilizados em componentes que estão em contato com frequente com água, como reservatórios, sistemas de esgoto e estações de tratamento de água. Esses produtos são materiais hidrofílico que reagem facilmente na presença de água, gerando uma estrutura cristalina por meio da cristalização do carbonato de cálcio. Como consequência, é esperado que sua aplicação resulte no aumento da densidade do material e redução da absorção de água, visto que os cristais precipitados da sua reação são insolúveis. Além disso, proporciona aumento do teor de silicato de cálcio hidratado na matriz, garantindo melhor desempenho mecânico dos materiais cimentícios (Roig-Flores et al., 2015).

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo avaliar a eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas. Essa análise foi realizada por meio de ensaios de absorção por capilaridade e porosidade, determinação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado e desempenho mecânico das amostras.

2. MATERIAIS

2.1. Cimento

Utilizou-se o cimento CPV-ARI, devido à sua pureza, evitando qualquer tipo de alteração no resultado da reatividade do agregado. É um dos cimentos mais propensos à ocorrência da RAA devido ao seu menor teor de escória e menor finura nos compostos. As propriedades físicas do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 1 atendendo especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 1. Resultados dos ensaios de caracterização física do cimento Portland.

Características de ensaio	Norma de referência	Especificação de norma	Resultado	Unidade de medida
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579:2012	$\leq 6,0$	5,4	%
Massa específica	ABNT NBR 16605:2017	Não aplicável	3,0	g/cm ³

2.2. Agregado miúdo

Os agregados miúdos foram utilizados conforme referência a Tabela 2, atendendo às quantidades ideais de cada fração. Para que fosse possível atender a esta relação foi necessário utilizar dois agregados miúdos distintos, que estão a um raio de aproximadamente 170 km de Rio Verde – GO.

Tabela 2. Granulometria requerida do material para ensaio de RAA.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	G
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

ABNT NBR 15577-4 (2018)

Para garantir o cumprimento dos dados da Tabela 2 foram realizados ensaios de massa específica, massa unitária e granulometria conforme ABNT NBR NM 52:2003, ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 248:2009, respectivamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3..

Tabela 3. Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

Agregado	Massa específica	Massa unitária	Módulo de finura
Areia fina	2.630 kg/m ³	1.513 kg/m ³	1.42
Areia grossa	2.621 kg/m ³	1.579 kg/m ³	2.54

2.3. Aditivo

O teor do aditivo cristalizante foi definido em função da massa de cimento das argamassas, sendo que a fabricante indica teores de 0,8% a 1,2%. Cardesa e Zephir (2014) utilizaram teores de 0,8%, 2,0% e 3,0% e Takagi et.al. (2012) utilizaram 2,5%. Ambos grupos de pesquisadores obtiveram resultados satisfatórios no que tange à cristalização e impermeabilização das misturas, sendo assim, para esta pesquisa foram adotados os teores de 1% e 2%. As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados do aditivo fornecidos pela própria fabricante.

Tabela 4. Características do aditivo cristalizante disponibilizadas na ficha técnica acessível pelo site da fabricante.

Característica	Valores Correspondentes	Unidades de medida
PH	10 – 13	%
Ponto de fusão	1000	°C
Aspecto Massa específica	Sólido em pó cinza 1,1	- g/cm ³
Odor e limite de odor	Característico de cimento	-

Penetron Admix (2018)

Tabela 5. Composição química do aditivo disponibilizada pela fabricante.

Nome Químico	CAS N°	%
Cimento Portland	65997-15-1	65 a 80
CTS-15-1*	Segredo Industrial	10 a 30
CTS-15-2*	Segredo Industrial	5 a 10
Hidróxido de cálcio e magnésio ($\text{CaMg}(\text{OH})_4$)	39445-23-3	1.5 a 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio ($\text{Ca}(\text{Mg}(\text{OH})_2\text{O})$)	58398-71-3	1.5 a 6
Hidróxido de cálcio	1305-62-0	1 a 2

*Segredo Industrial - A porcentagem exata (concentração) da composição foi retida como segredo industrial.

Penetron Admix (2018)

3. MÉTODOS

O método de investigação seguiu a fluxograma de etapas apresentado na Figura 2. Todas as etapas descritas a seguir têm por finalidade atender aos requisitos da NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

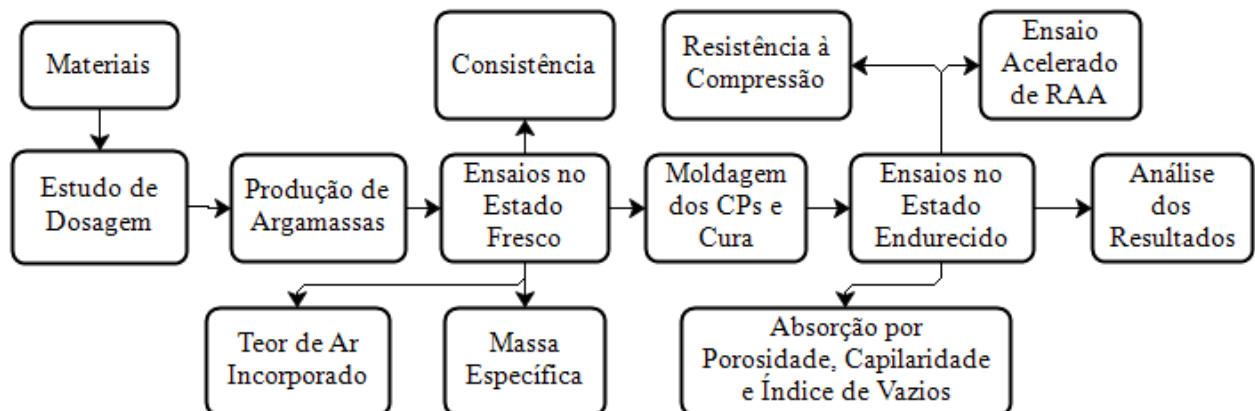


Figura 2. Estrutura metodológica da pesquisa.

3.1. Determinação do traço

Para a determinação da expansão da argamassa pelo método acelerado, o traço é composto por uma parte de cimento, 2,25 partes de agregado e relação água/cimento (a/c) de 0,47. Para a moldagem de três barras de argamassa, cuja massa específica do agregado (d) seja maior ou igual a 2,45 g/cm³, deve-se adotar as frações de 440 gramas de cimento e 990 gramas de agregado.

A realização dos ensaios seguiu conforme Figura 2, os traços foram definidos de acordo com a Tabela 6, sendo uma mistura referência (AR) sem aditivo e duas misturas (AA1 e AA2) como teores de 1% e 2% de aditivo cristalizante. Durante a produção das misturas, o aditivo foi previamente diluído na água de amassamento, conforme especificado pela fabricante.

Tabela 6. Traços unitários das argamassas estudadas.

Traço	Cimento	Areia	Água	Aditivo Cristalizante
AR	1	2,25	0,47	-
AA1	1	2,25	0,47	0,01
AA2	1	2,25	0,47	0,02

3.2. Ensaios no estado fresco

Os ensaios de massa específica e teor de ar incorporado das argamassas foi realizado conforme NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a determinação do teor de ar incorporado utilizaram-se dos resultados da massa específica obtida através da relação das massas teórica e estimada.

A consistência das misturas foi avaliada dentro das recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016).

3.3. Moldagem dos corpos de prova e cura

Os corpos de prova cilíndricos e os corpos de prova prismáticos foram moldados em concordâncias com as NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 13729 (ABNT, 2005), respectivamente. Os corpos de prova prismáticos com dimensões de 30x25x285mm para avaliação da expansão foram moldados consoante à NBR 15577-4 (ABNT, 2018), em duas camadas adensadas com 20 golpes em cada.

Para o ensaio acelerado de RAA são necessárias ao menos três barras de argamassa para cada agregado utilizado. As barras passaram por uma cura em câmara úmida a 23°C, por um período de 24 horas, com suas faces protegidas de respingos. Após esse período, as argamassas foram removidas das fôrmas e colocadas em banho termorregulador na solução de hidróxido de sódio. Esta última etapa é parte integrante do procedimento de ensaio no estado endurecido.

3.4. Ensaios no estado endurecido

Conforme estabelecido na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), os moldes de argamassa passaram por um período de 30 dias imersos em solução de NaOH (hidróxido de sódio – 1,0 N), conforme apresentado na Figura 3. Durante esse período foram realizadas oito leituras das dimensões dos corpos de prova, sendo obrigatoriamente uma aos 16 dias e outra aos 30 dias após a moldagem.

O ensaio de resistência à compressão foi executado com os corpos de prova cilíndricos segundo procedimento estabelecido na NBR 7215 (ABNT, 2019) e o ensaio de resistência a tração na flexão foi realizado conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando-se os corpos de prova prismáticos, ambos em prensa hidráulica, registrados na Figura 4.

Os ensaios de absorção por capilaridade – em gramas por centímetros quadrados – e índices de vazios e absorção por porosidade – ambos em porcentagem – foram realizados de acordo com as NBR 15259 (ABNT, 2005) e NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente. Esses ensaios foram executados com o intuito de avaliar o efeito cristalizante do aditivo e relacioná-lo ao possível retardamento da RAA nas argamassas.



Figura 3. Corpos de prova imersos em solução de NaOH para realização dos ensaios de expansão.

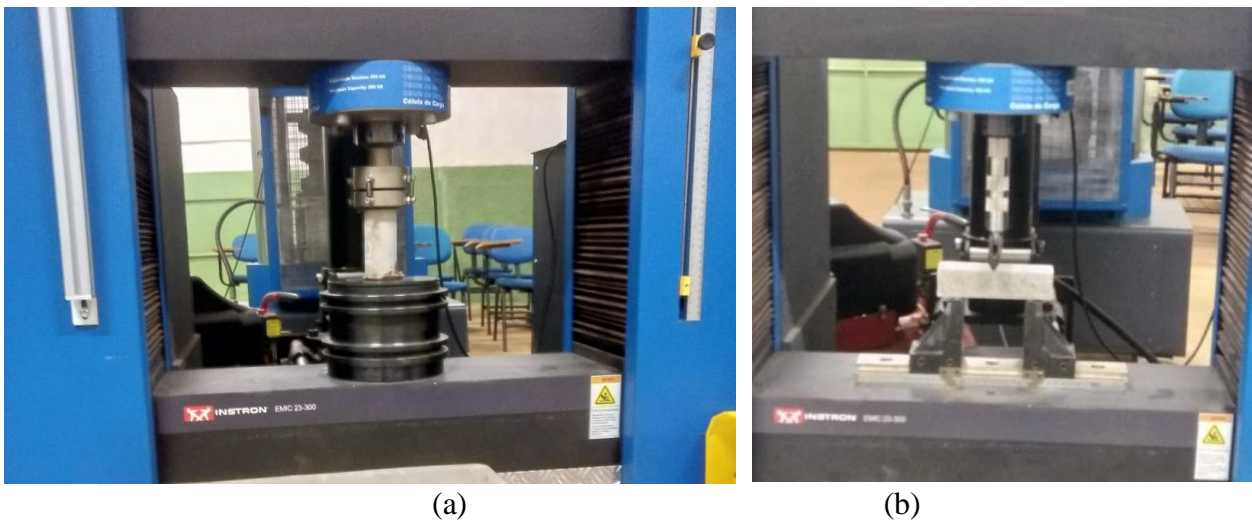


Figura 4. Ensaio de resistência à compressão (a) e ensaio de resistência à tração na flexão (b) aos 28 dias dos corpos de prova de argamassa.

3.5. Análise de resultados

Todos os dados pertinentes ao ensaio acelerado de RAA foram analisados e comparados seguindo as tabelas fornecidas pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018), onde são determinados a reatividade potencial do agregado, o grau de risco de ocorrência, as consequências e classificação de reatividade (Figura 5). Os demais ensaios supracitados foram executados visando ampliar e complementar a abordagem dos efeitos do aditivo no desempenho e comportamento das argamassas.

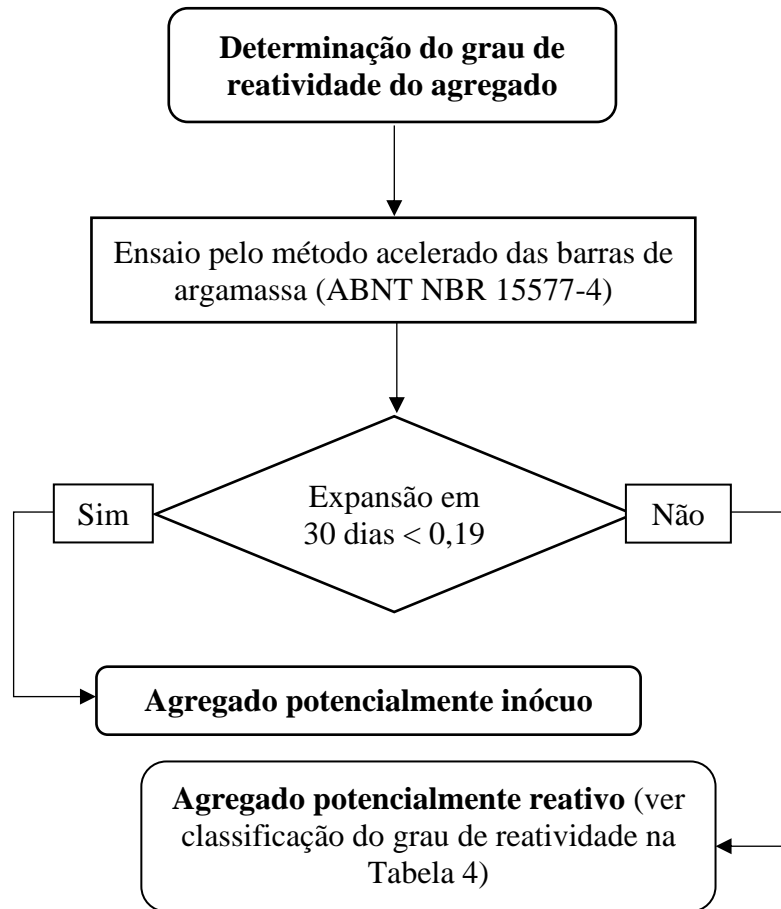


Figura 5. Procedimento para determinação do grau de reatividade do agregado conforme estabelecido na NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ensaios no estado fresco

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios realizados com as misturas no estado fresco. É possível notar que o aditivo cicatrizante tem efeitos na argamassa no estado fresco, onde à medida em que o teor de aditivo aumenta, a massa específica e o espalhamento aumentam, e o teor de ar incorporado reduz.

Tabela 7. Resultados de massa específica, espalhamento e teor de ar incorporado das argamassas avaliados no estado fresco.

Traço	Massa Específica	Espalhamento	Teor de ar incorporado
AR	2216.87 kg/m ³	267 mm	1.05 %
AA1	2226.51 kg/m ³	278 mm	0.34 %
AA2	2228.92 kg/m ³	283 mm	0.09 %

As misturas registraram aumentos não expressivos de massa específica que, por sua vez, pode ser explicado pela finura do aditivo utilizado. Os grãos mais finos do aditivo preenchem os vazios intersticiais e elevam a coesão das misturas em até 0,5%.

Embora o aditivo seja muito similar ao cimento, o espalhamento não diminuiu, pelo contrário, foi observado um aumento na fluidez. Isso se deve aos diferentes produtos químicos presentes na mistura, que podem atuar como um plastificante redutor de água. Esse aumento de espalhamento indica que o aditivo pode reduzir a relação água/cimento para uma determinada consistência, conforme também constatado por Cardesa e Zephir (2014). Alguns pesquisadores, como Moreira (2016) e Takagi, Lima e Helene (2012) identificaram perda de consistência com o uso de aditivos semelhantes, entretanto não o mesmo produto desta pesquisa. Fabricantes podem utilizar diferentes produtos químicos na produção de aditivos cristalizantes e, no caso do produto estudado neste artigo, a consistência foi melhorada.

No que diz respeito ao teor de ar incorporado, assim como na massa específica, a finura do material é responsável por reduzir o teor de ar com o aumento da quantidade de aditivo na mistura. Essa redução no estado fresco pode colaborar para reduções do índice de vazios, capilaridade e porosidade das misturas endurecidas.

4.2. Ensaio no estado endurecido

Como resultados foram obtidos os dados apresentados nas Figuras 6 a 13. A Figura 6 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão das argamassas ensaiadas. Nota-se que a à medida em que o teor de aditivo é aumentado, a resistência à compressão também cresce, pois a mistura AA2 obteve o melhor desempenho, seguida pela AA1 e AR, respectivamente.

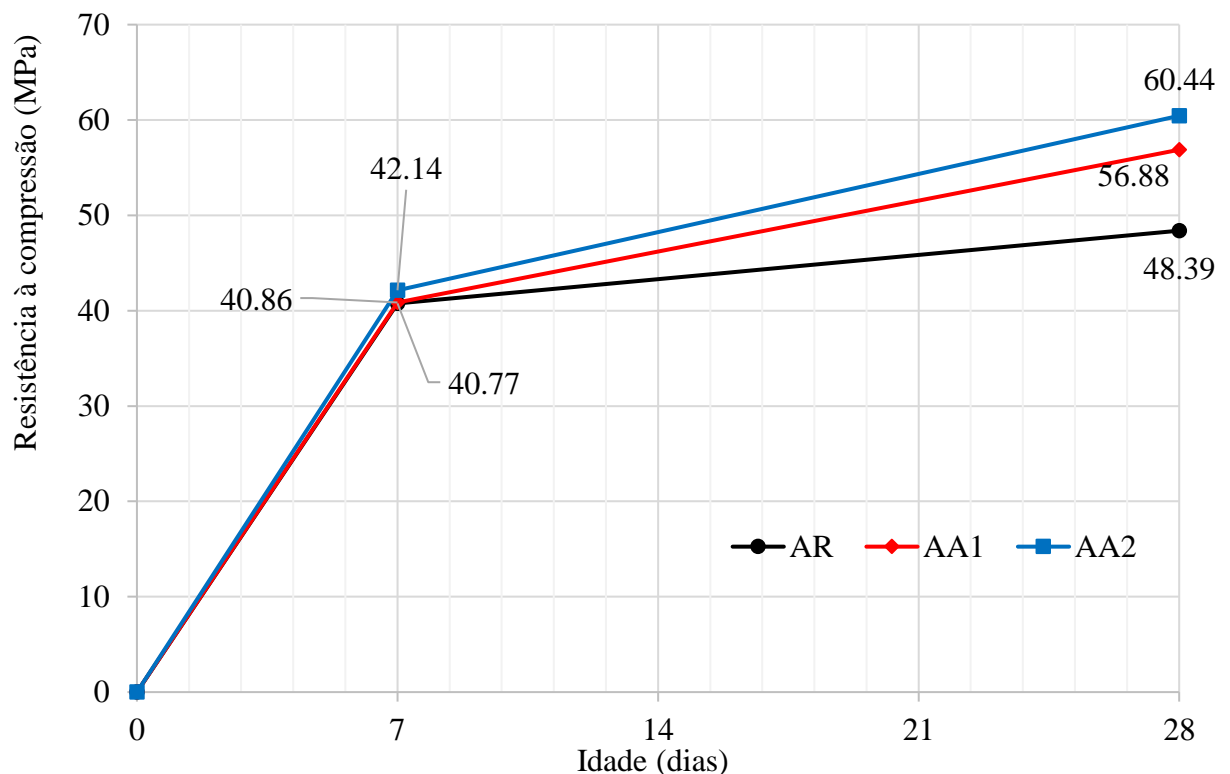


Figura 6. Resultados de resistência à compressão (MPa) das argamassas aos 7 e 28 dias.

Esse comportamento é semelhante ao observado por Takagi, Lima e Helene (2012); Cardesa e Zephir (2014); e, García-Vera, Tenza-Abril, Saval e Lanzón (2019). Em todas as pesquisas constatou-se que, com teores iguais ou superiores a 1% de aditivos cristalizantes sob a massa do cimento, a resistência à compressão em concretos e argamassas cresce quando comparadas a misturas sem aditivo.

Aos sete dias é possível observar uma aproximação dos resultados de resistência das três misturas. Isso se deve ao curto período de tempo decorrido desde a produção das argamassas para reação do aditivo, visto que sua reatividade é dependente das reações de hidratação do cimento. Entretanto, aos 28 dias, já é notório o ganho de resistência das misturas com aditivo em relação à mistura referência. A argamassa AA2 atingiu uma resistência 24,9% superior à AR, enquanto que a AA1 alcançou um valor em torno de 17,5% superior à AR. Como nenhuma informação entre as misturas foi alterada além do uso do aditivo, o ganho de resistência se deve à utilização do mesmo.

A Figura 7 apresenta os resultados referentes aos ensaios de resistência à tração na flexão, onde, assim como nas resistências à compressão, constata-se o ganho de desempenho com o uso do produto cristalizante. Novamente, a mistura AA2 alcançou o melhor resultado, atingindo um valor aproximadamente 12,8% superior à AR, enquanto a AA1 apresentou uma resistência 11,3% mais alta que a referência.

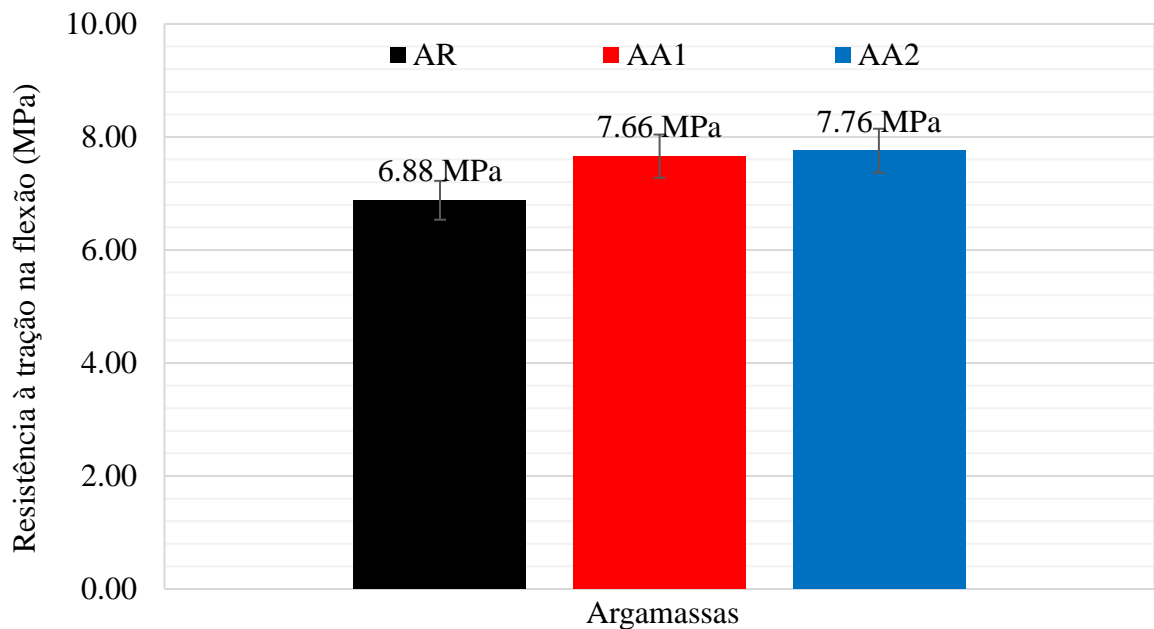


Figura 7. Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) das argamassas aos 28 dias.

O ganho de resistência à tração na flexão das argamassas com aditivo pode ser explicado pela ação cristalizante do produto que resulta em maiores áreas de seção transversal maciça, aumentando assim, a capacidade portante do material. Esse ganho de resistência à tração, mesmo que não expressivo, também foi constatado por Moreira (2016) em misturas com 0,8% de aditivo cristalizante.

De acordo com a fabricante do aditivo, o material é capaz de preencher fissuras e vazios de até 0,5mm. A Figura 8 registra imagens microscópicas com zoom de ampliação de 35x das seções transversais dos corpos de prova sem (Figura 8a) e com aditivo (Figura 8b). Na Figura 8b é possível visualizar uma parcela de material com coloração distinta do padrão sem aditivo, o que permite afimar o poder cicatrizante do produto químico.

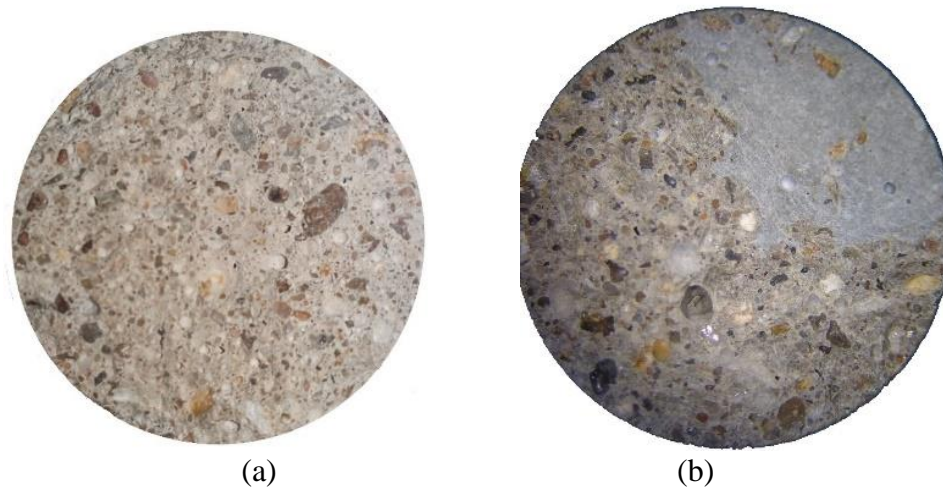


Figura 8. Imagem microscópica da seção transversal do corpo de prova sem aditivo (a) e com 2% de aditivo (b), ambos após o rompimento aos 28 dias. Imagens com zoom de ampliação de 35x.

Tendo em vista que o corpo de prova apresenta algumas irregularidades internas, possivelmente causadas durante sua produção, o aditivo reagiu e acabou por preencher os pequenos vazios no interior dos corpos de prova. Na área “cicatrizada” não são observadas concentrações de agregado miúdo que, em consonância com dados apresentados pelo Japan Concrete Institute no JCI-TC075B (2009), afirmam a ideia do efeito cristalizante.

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados obtidos através do ensaio de absorção de água por porosidade e índices de vazios realizados conforme requisitos da NBR 9778 (ABNT, 2005). Percebe-se que a presença do aditivo cicatrizante reduz tanto a absorção de água por porosidade quanto o índice de vazios das misturas.

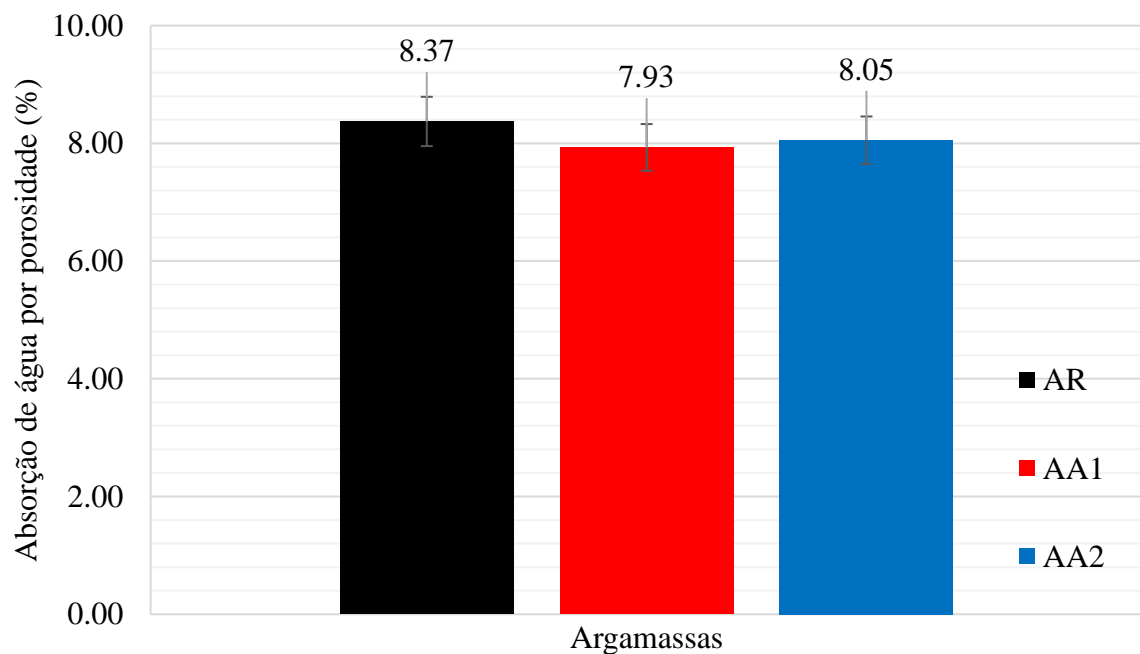


Figura 9. Resultados absorção de água por porosidade ou absorção de água sob pressão (%) em corpos de prova de argamassa imersos em água aos 28 dias.

Esse ensaio, por ser realizado com corpos de prova sob pressão, identifica a porosidade aberta e fechada e o índice de vazios total das argamassas. Nota-se que a mistura com teor de 1% alcançou atingiu os melhores resultados, atestando que a faixa de teores indicada pela fabricante é adequada. Ao aumentar o teor de aditivo para valor superior à faixa indicada, observa-se um novo aumento tanto na porosidade quanto no índice de vazios. Entretanto, mesmo que os resultados das argamassas com aditivo sejam melhores que a mistura referência, a diferença entre elas não é expressiva, sendo a maior redução na porosidade e no índice de vazios em torno de 5,3%.

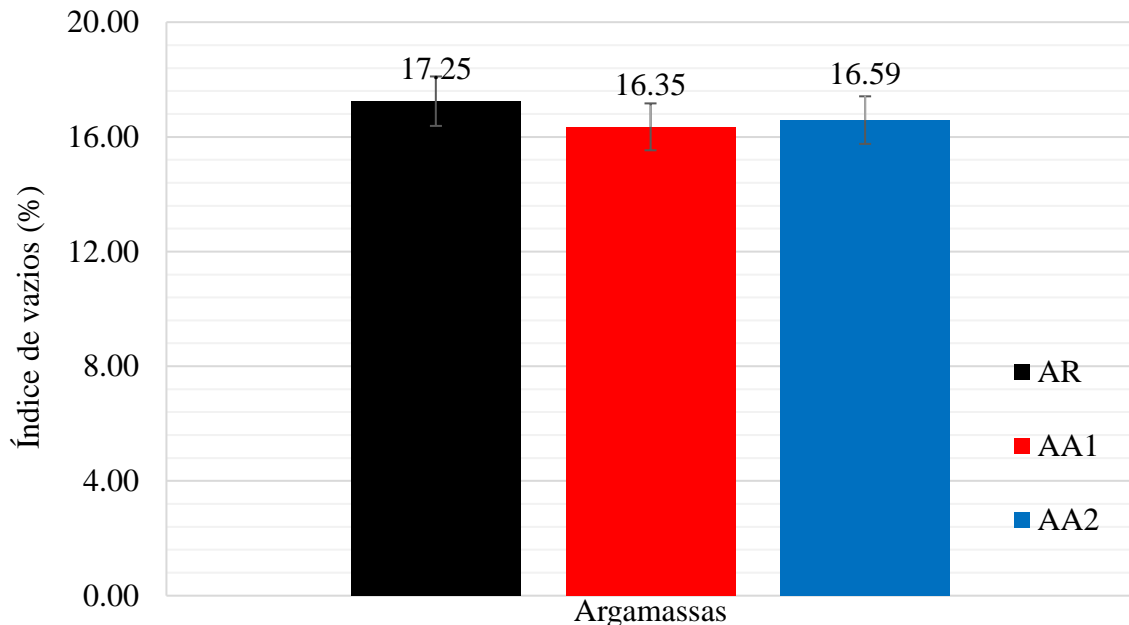


Figura 10. Resultados índice de vazios (%) obtidos com corpos de prova de argamassa imersos em água aos 28 dias.

As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de determinação da absorção e coeficiente de capilaridade realizados conforme NBR 15259 (ABNT, 2005). A absorção por capilaridade é definida pela área de seção transversal em contato constante com água sendo mensurada em gramas por centímetro quadrado. É visível que a adição do aditivo cicatrizante em teores superiores a 1% reduzem consideravelmente a absorção por capilaridade das argamassas. Os valores de capilaridade, diante do resultado apresentado na Figura 11, podem reduzir em aproximadamente 20%, atestando, novamente, o poder selante do aditivo. Resultados semelhantes foram apresentados por Takagi, Lima e Helene (2012) e Pazderka e Hájková (2016), ambos com teores de 2%.

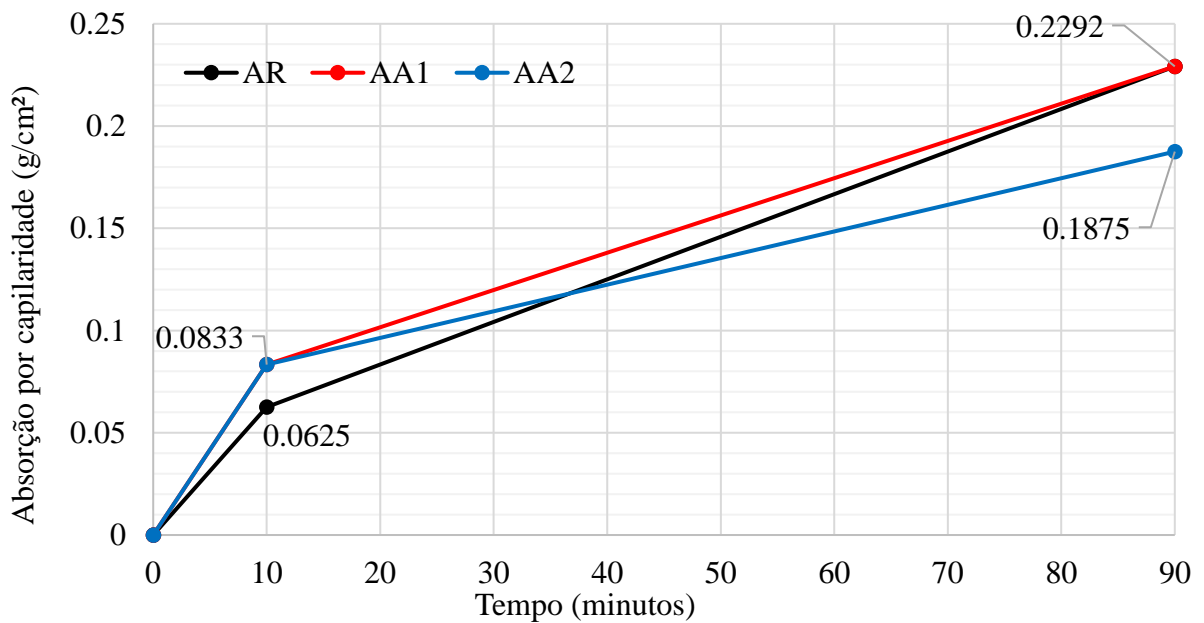


Figura 11. Resultados de absorção de água por capilaridade (%) em face do corpo de prova de argamassa em contato com água em nível constante de 5mm.

O coeficiente de capilaridade refere-se ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das leituras realizadas aos 10 e 90 minutos, sendo calculado pela subtração entre as massas registradas nessas determinações.

Observa-se que, quanto maior o teor de aditivo utilizado na mistura, menor será o coeficiente de capilaridade e, portanto, menor será a absorção por capilaridade por fração de tempo. Assim como nos dados imediatamente anteriores, a mistura AA2 apresentou o melhor resultado, chegando a apresentar um coeficiente cerca de 37,5% inferior à AR, enquanto que a AA1 chegou a atingir uma redução de 12,7% em relação à AR.

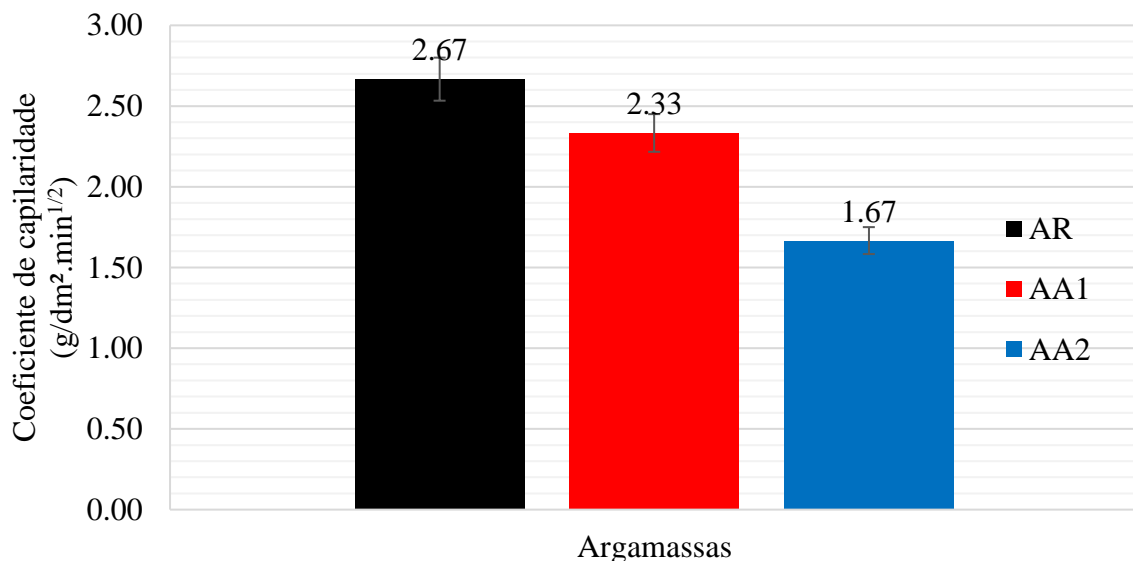


Figura 12. Coeficientes de capilaridade (g/dm².min^{1/2}) das argamassas, determinados com leituras realizadas aos 10 e aos 90 minutos de ensaio.

A Figura 13 apresenta os resultados referentes às determinações das expansões realizadas nos corpos de prova durante os ensaios acelerados de RAA em argamassas conforme a NBR 15577-4 (ABNT, 2018). De antemão pode-se constatar uma elevada expansão inicial, aos 6 dias, nas argamassas com aditivo cristalizante.

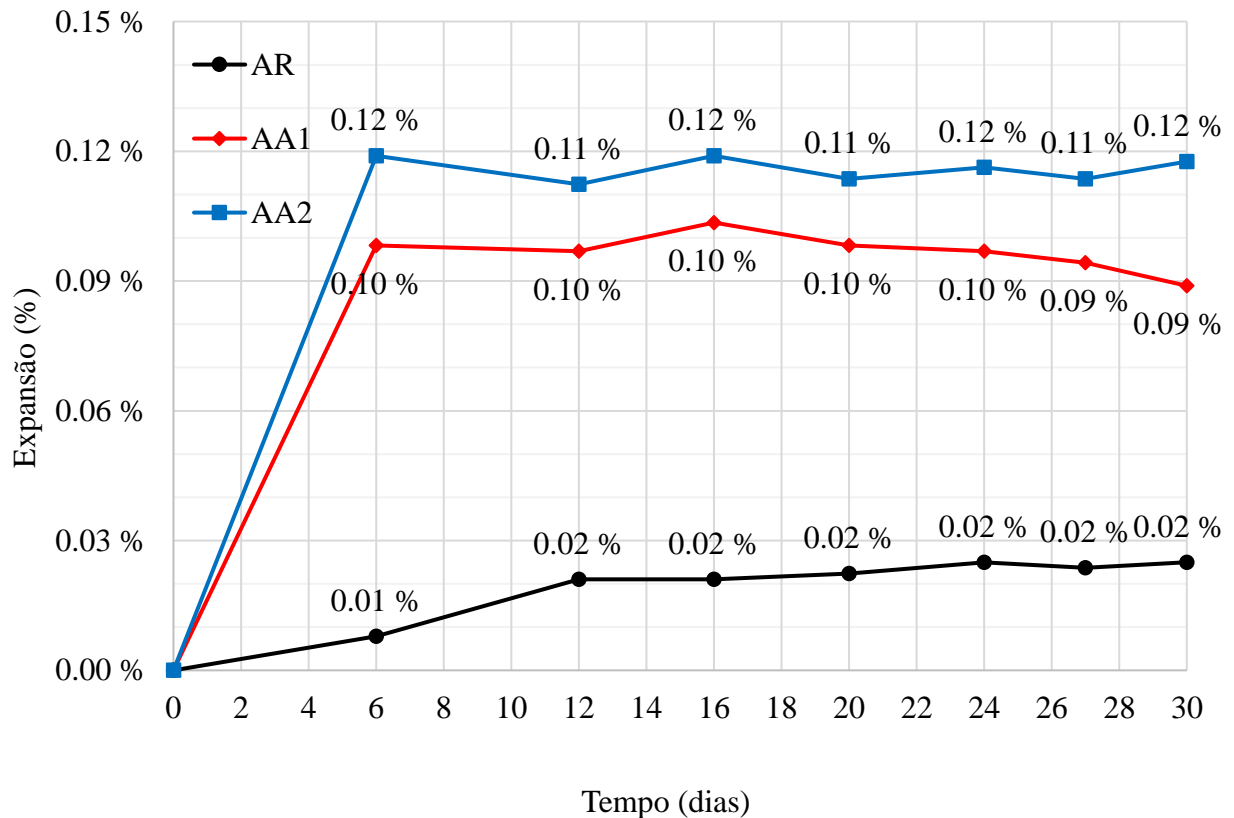


Figura 13. Expansão (%) dos corpos de prova durante os ensaios acelerados de RAA em argamassas registradas por um período de 30 dias corridos após a moldagem.

Esse resultado faz notar que os produtos alcalinos presentes na composição do aditivo, descritos na Tabela 5, podem ter corroborado para a evolução de expansões na primeira semana, haja vista que fica evidente que a evolução volumétrica inicial cresce à medida em que o teor de aditivo também cresce.

As diferenças entre as variações das argamassas são expressivas, onde a AA2 apresentou uma expansão inicial, aos 6 dias, cerca de 1100% superior à AR, enquanto a AA1 registrou uma variação por volta de 900% superior à AR. Entretanto, após esse período de 6 dias, a evolução das expansões cessam e as dimensões dos corpos de prova estabilizam e, conseqüentemente, essas porcentagens reduzem em função do tempo e caem para 500% e 350%, respectivamente.

As expansões foram claramente causadas pela aditivo, pois a argamassa AR apresentou valores bastante inferiores. Analisando a composição química do aditivo, é possível salientar que as reações possam ter sido causadas pelo magnésio de sua composição, entretanto para melhores determinações é preciso que sejam realizadas pesquisas com enfoque microestrutural

Independente disso, acredita-se que o aditivo possua um tempo de ativação de aproximadamente uma semana, iniciando a selagem dos vazios e poros e controlando as variações volumétricas das argamassas a partir do momento de estabilização das expansões.

É importante frisar que essas leituras foram registradas em corpos de prova prismáticos de argamassa de pequenas dimensões. Caso seja aplicado em grande escala, o uso desse aditivo pode

exigir certa atenção para os limites estabelecidos pelas fabricantes, a fim de evitar maiores transtornos.

É indicado o uso de produtos inibidores de reação álcali-agregado, como por exemplo, materiais pozolânicos. Esses materiais inibirão as expansões iniciais e evitaram o surgimento de danos aos componentes de concreto ou argamassa nas primeiras idades, permitindo que o aditivo tenha todos seus elementos constituintes destinados à selagem dos poros e vazios. No entanto, a análise do comportamento do aditivo em conjunto com materiais pozolânicos, como sílica ativa, deve ser estudado e fica como sugestão para pesquisas futuras.

Por fim, no que tange à classificação da reatividade potencial do agregado, considerando os limites estabelecidos na NBR 15577-1 (ABNT, 2018), o material se mostrou como potencialmente inócuo grau R0, isto é, a expansão das barras de argamassa aos 30 dias foi inferior a 0,19%. Ainda que as diferenças entre as expansões das argamassas sejam elevadas, o grau de risco referente a esta classificação é desprezível, não se fazendo necessária nenhuma ação de mitigação devida à RAA em função do agregado utilizado.

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o aditivo cristalizante utilizado nessa pesquisa, no que se refere à inibição da reação álcali-agregado não colaborou nos primeiros dias. Pelo contrário, a presença de produtos alcalinos na sua composição elevou a porcentagem de expansões iniciais até o momento de início da reação do aditivo com os produtos de hidratação do cimento. Diante disso, é indicado o uso de materiais inibidores de RAA, como pozolanas, em paralelo aos aditivos cicatrizantes de composição química semelhante.

Não obstante, seu uso mostrou-se bastante satisfatório ao tratar de desempenho mecânico, absorção de água e índice de vazios em teores de 1% e 2% de aditivo. Sua utilização resultou em ganhos de resistência à compressão e tração na flexão, além de redução no índice de vazios e absorção por porosidade. Entretanto seu maior trunfo se encontra na redução significativa de coeficiente e absorção por capilaridade, mostrando-se um produto indicado para elementos que estão em constante contato com água, como reservatórios e sistemas de saneamento básico.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2019). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2009). *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). *NBR 13278: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). *NBR 15259: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2018). *NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação de reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados com concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2018). *NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Cadersa, A. S., Zephir, D. (2014), Effect of Penetron Admix on the Properties of concrete. *University Of Mauritius Research Journal*, v. 20, Réduit.
- Couto, T. A. (2008). *Reação Álcali-Agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas*. 2008. 191 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- García-Vera, V. E., Tenza-Abril, A. J., Saval, J. M., Lanzón, M. (2019). *Influence of Crystalline Admixtures on the Short-Term Behaviour of Mortars Exposed to Sulphuric Acid*. *Materials*, v. 12, n. 82, p. 16. <https://doi.org/10.3390/ma12010082>
- Japan Concrete Institute, JCI - TC075B. (2009). *State-of-the-art report of the JCI Technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials*. In: 4º International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, Japan.
- Junior, A. B., Ferro, I. P. (2016). *Reação álcali-agregado: um breve estudo da ocorrência nos blocos da ponte Paulo Guerra – Recife/PE*. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (CBPAT). *Anais...* Belém: ALCONPAT.
- Moreira, M. M. (2016). *Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização*. 162 f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- Pazderka, J., Hájková, E. (2016). *Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete*. *Acta Plytechnica*, n. 56, p. 306-311. <https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>
- Penetron (2018). *Penetron Admix*. Lorena, Penetron.
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., Ferrara, L. (2015). *Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments*. *Construction And Building Materials*, v. 86, p. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>.
- Rolim, P. H. B. (2010). *Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio*. 109 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Silva, P. N. (2007). *Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF.: Influência da Reação nas Propriedades do Concreto*. 2007. 241 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Takagi, E. M., Lima, M. G., Helene, P. R. L. (2012). *Contribuição para estudo do efeito da autocicatrização em concretos ativado por catalisadores cristalinos em estruturas de túneis submetidas à exposição contínua de água*. In: Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, 3, *Anais...* São Paulo: Seminário Internacional “South American Tunnelling”.

Efeito na corrosão do concreto armado com adição de pó de grafite e sua avaliação nas propriedades físico-electroquímicas

A. Flores-Nicolás¹ , M. Flores-Nicolás¹ , J. Uruchurtu-Chavarín^{1*} 

* Autor de Contato: juch25@uaem.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

Recepção: 28/07/2020 | Aceitação: 06/11/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se o efeito da corrosão do concreto armado sem e com adição de pó de grafite com baixo teor de carbono. Os processos de identificação de fases e as propriedades físico-electroquímicas do concreto foram analisados por técnicas de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varrimento (MEV), potencial de meia célula, ruído eletroquímico (EN) e resistência à polarização linear (RPL). As amostras foram testadas em solução salina durante 168 dias. Os resultados mostram que ao adicionar pó de grafite em uma quantidade de 2,5% em peso do cimento, a resistência à compressão foi aumentada em comparação com a amostra de controle. Em testes eletroquímicos, mostra que a corrosão das armaduras de aço no concreto aumentou conforme o nível de substituição de grafite cresceu.

Palavras-chave: concreto armado; grafite; corrosão; cloretos.

Citar como: Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Uruchurtu-Chavarín, J. (2021), "Efecto de la corrosión del concreto reforzado con adición de polvo de grafito y su evaluación en sus propiedades físico-electroquímicas", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 18 – 33, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

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

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor A. Flores-Nicolás contribuiu com a ideia original, coleta de dados, metodologia experimental, discussão dos resultados e redação do trabalho. O autor M. Flores-Nicolás contribuiu com a coordenação das experiências, redação e revisão do trabalho. O autor J. Uruchurtu-Chavarín contribuiu com a coordenação geral do trabalho, revisão, orientação ao autor e supervisão das atividades.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties

ABSTRACT

The corrosion of reinforced concrete without and with the addition of graphite powder with low carbon content was evaluated. Phase identification processes and physical-electrochemical properties of the concrete were analyzed using X-ray diffraction techniques (XRD), scanning electron microscopy (SEM), half-cell potential, electrochemical noise (EN) and linear polarization resistance (LPR). Samples were studied for 168 days in saline solution. The results show that, when adding graphite powder in an amount of 2.5% by weight of cement, the compressive strength increased if compared with the control sample. The electrochemical tests show that the higher the level of graphite replacement, the higher the level of corrosion in concrete.

Keywords: reinforced concrete; graphite; corrosion; chlorides.

Efecto de la corrosión del concreto reforzado con adición de polvo de grafito y su evaluación en sus propiedades físico-electroquímicas

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto de la corrosión del concreto reforzado sin y con adición de polvo de grafito con bajo contenido de carbono. Los procesos de identificación de fases y las propiedades físico-electroquímicas del concreto se analizaron mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), potencial de media celda, ruido electroquímico (EN) y resistencia a la polarización lineal (RPL). Las muestras se estudiaron durante 168 días en solución salina. Los resultados muestran que al adicionar polvo de grafito en cantidad de 2.5% en peso del cemento, se incrementó la resistencia a la compresión en comparación con la muestra control. En las pruebas electroquímicas se demuestra que la corrosión del acero de refuerzo en el concreto se incrementó al aumentar el nivel de reemplazo de grafito.

Palabras clave: concreto reforzado; grafito; corrosión; cloruros.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção na grande maioria das obras civis, tornando-se uma das estruturas mais resistentes devido às suas propriedades mecânicas. Inúmeras investigações têm estudado a durabilidade de estruturas de concreto armado por exigir alta tecnologia devido às suas necessidades de conservação e manutenção (Vidaud e Vidaud, 2012). A corrosão das armaduras de aço é uma das principais causas da durabilidade do concreto. Esse fenômeno é afetado pelo tipo de ambiente no qual está exposto, causando danos à estrutura ao longo do tempo. A pasta de concreto confere necessariamente ao aço uma proteção de dupla natureza ao aço embutido, em primeiro lugar, fornece uma barreira física que o isola do meio ambiente e, em segundo lugar, o líquido confinado nos poros do concreto é um eletrólito que o torna permanentemente passivo (González e Jimmy, 2003). Essas propriedades são afetadas, portanto o uso de novos materiais em pasta de concreto é importante para melhorar suas propriedades físicas e estender a durabilidade das estruturas de concreto.

Atualmente, o uso de compósitos à base de cimento com partículas de carbono e outras adições são novos materiais compósitos com excelentes propriedades físicas e químicas que os tornam adequados para uso em produtos tecnologicamente avançados (Chung, 2000). Os principais materiais de carbono adicionados ao concreto incluem: fibras de carbono, flocos de grafite, pó de grafite ou nanotubos de carbono; esta pesquisa foi direcionada ao uso de pó de grafite. Grafite é uma forma alotrópica do elemento carbono, consistindo em folhas de átomos de carbono (grafenos) que formam um sistema de anéis condensados e planos. Existem duas formas de empilhamento possíveis de grafenos: o hexagonal do tipo Bernal (ABAB) e o romboédrico (ABCABC); a chamada estrutura “hexagonal simples” (Tascón, 2007).

(Heymsfield et. Al., 2013) incorporou este elemento na pasta de concreto e relatou que a absorção do pó de grafite diminuiu conforme o tamanho do agregado do pó de grafite aumentou, conseqüentemente, a resistência do traço de design aumentou à medida que o tamanho do agregado de pó de grafite aumentou. Além disso, indica que o teor de grafite pode principalmente melhorar as propriedades de condutividade térmica e reduzir a capacidade de calor específica (Wu et. Al., 2014).

(Yuan et. Al., 2012) estudaram o grafite moído expandido (G) com alta temperatura e relataram que a resistência à compressão diminuiu com a adição de grafite e o aumento da relação a/c , enquanto a condutividade térmica e o volume da capacidade de aquecimento aumentam com a adição de grafite. Nos testes de propriedades eletroquímicas é mostrado que ocorre uma diminuição no nível de corrosão quando a razão de adição de material de carbono é aumentada (Garcés et. Al., 2007).

(Ha et. Al., 2005) investigado sobre a corrosão do aço de reforço embutido no cimento Portland comum, relatou corrosão severa quando o nível de carbono e cinzas volantes aumentou; a condição de umedecimento e secagem com cloreto de sódio NaCl a 3% encontrou-se entre 6% e 8% de carbono misturado com cinzas volantes.

Neste tópico de pesquisa, ele apresenta um estudo sobre o comportamento à corrosão do concreto armado, com a adição de pó de grafite como substituto parcial do peso do cimento e a análise de suas propriedades físico-químicas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Preparação de amostras

Os traços de concreto foram preparados utilizando o método de projeto (ACI. 211.1-91, 2002), resistência teórica de projeto de 250 kg/cm² após 28 dias de cura e abatimento de 12 ± 2 cm; Utilizando o cimento Portland CPC 30 R (ASTM C-150, 2020), areia de rio com tamanho nominal máximo de 4,75 mm e agregado grosso de brita de tamanho máximo de 19 mm foi utilizado como agregado fino. Foi usado aço de reforço ondulado convencional n.º 1018, uma lixa foi usada para a pré-limpeza. O pó de grafite (GP) foi adicionado nas seguintes porcentagens: 0% (controle), 2,5%, 7,5% e 15% em relação ao peso do cimento. A Tabela 1 mostra as principais características do GP.

Tabela 1. Características do GP utilizado

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Umidade (%)	Dureza (Mohs)
GP	63	2.22	2.5	1-2

A dosagem dos materiais utilizados neste trabalho está mencionada na Tabela 2, o peso dos agregados finos e graúdos não foi modificado e nenhum aditivo foi utilizado na mistura do concreto. Nas amostras M3 e M4 com quantidade de grafite de 7,5% e 15% em peso do cimento, foi adicionada uma quantidade maior de água, pois a pasta era pouco trabalhável e isso manteve a faixa de abatimento de 12 cm ± 2 para os 4 projetos de mistura.

Tabela 2. Traços para 1 m³.

Material	M1-0%	M2-2.5%	M3-7.5%	M4-15%
Cimento (Kg)	366	357	339	311
Água (l)	218	218	235	251
a/c	0.59	0.61	0.69	0.81
Areia (Kg)	817	817	817	817
Brita (Kg)	903	903	903	903
GP (Kg)	000	009	027	055

A preparação das amostras de concreto foi realizada de acordo com a norma (ASTM C-31, 2019). Para os ensaios eletroquímicos, foram confeccionados 3 corpos de prova cúbicos com dimensões de 10 cm por lado com o mesmo traço de mistura, conforme mostrado na Figura 1. 3 hastes onduladas foram embutidas em cada corpo de prova cúbico, com diâmetro de 0,95 mm. O comprimento da haste embutida era de 5,5 cm. No nível da interface da pasta com o ambiente, a haste foi isolada de aproximadamente 5 cm de comprimento com fita de teflon ao redor da haste.

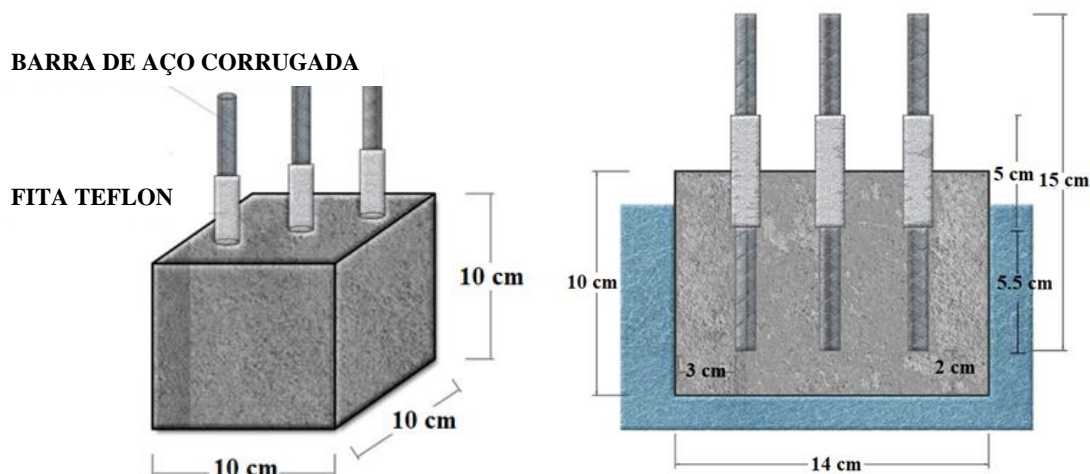


Figura 1. Dimensões cúbicas de amostras de concreto.

Os corpos de prova foram curados por 28 dias, em condições adequadas de umidade. As medições eletroquímicas começaram 24 horas após os tubos de ensaio cúbicos serem imersos em solução salina de cloreto de sódio a 3% por 168 dias de exposição.

2.1.1 Determinação da porosidade do concreto

A medição do ar incorporado foi realizada pelo método da pressão e utilizado o recipiente tipo B (ASTM C-231, 2017). A porosidade do concreto (P) ou vazios totais no material compósito foi modelada (1) em função de: a relação água/cimento, o grau de hidratação do cimento (h), o volume de ar aprisionado (A), as quantidades de agregados finos (areia, Af) e grossos (cascalho, Ag), e de cimento (c); e a massa específica dos agregados (ρ_f e ρ_g). Neste estudo, o valor de 0,7 foi aplicado para a hidratação do cimento (Solís-Carcaño e Moreno, 2006).

$$P = \frac{\left[\left(\frac{a}{c}\right) - 0.36h + \left(\frac{A}{c}\right)\right]}{0.317 + \left(\frac{1}{\rho_f}\right)\left(\frac{A_f}{c}\right) + \left(\frac{1}{\rho_g}\right)\left(\frac{A_g}{c}\right) + \left(\frac{A}{c}\right)} \quad (1)$$

2.2 Técnica de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com os parâmetros da norma (ASTM C-39, 2020). Foram confeccionadas amostras cilíndricas com dimensões padronizadas: 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. O ensaio de compressão foi realizado aos 7, 14 e 28 dias de cura, para observar o aumento da resistência ao atingir a cura máxima. O lançamento do cilindro foi realizado com placas de neoprene e carga constante foi aplicada até a falha da amostra.

2.3 Técnicas eletroquímicas

2.3.1 Medição de potencial de meia célula

A norma (ASTM C-876-09, 2009) estabelece faixas no potencial de corrosão (Ecorr) que indicam a probabilidade de corrosão superficial e possível risco de corrosão da armadura. Com os valores obtidos, é possível fazer um diagnóstico do grau de corrosão da armadura de concreto. A análise de medição do potencial de meia célula foi realizada com base no uso de um eletrodo de referência de cloreto de prata saturado com prata (Ag / AgCl). Foi determinada a medição do potencial de cada barra de aço embutida no concreto, o valor registrado é a média dessas medições. As medições foram feitas durante 168 dias de exposição à solução salina. Foram usados um multímetro e uma chave que conectava os dois eletrodos, entre o cloreto de prata e a barra de aço.

A Tabela 3 apresenta a conversão dos potenciais de corrosão obtidos com o eletrodo de referência saturado cobre / sulfato de cobre adicionando +50 mV (Berkeley et. Al., 1990; Chess et. Al., 1998).

Tabela 3. Critério para medir o risco de danos às armaduras de concreto, na medição do potencial de meia-célula.

E_{corr} vs Cu/CuSO ₄ (mV)	E_{corr} vs Ag/AgCl (mV)	Risco de dano (%)
> -200	>-150	10% probabilidade de corrosão
Entre -200 A -350	Entre -150 A -300	Zona de Incerteza
< -350	< -300	90% probabilidade de corrosão

2.3.2 Técnica de ruído eletroquímico

A corrosão é considerada um processo em equilíbrio e com cinética constante, enquanto, no caso do ruído eletroquímico, os desequilíbrios são registrados nas reações eletroquímicas em intervalos de tempo muito curtos (Goellner, 2004). Para as medidas de ruído eletroquímico, foi utilizado um potenciostato Gill AC-ACM Instruments, sendo realizados 1.024 pontos de leitura com velocidade constante de 1 ponto / segundo. A configuração para a medição foi de três hastes de aço nominalmente idênticas, enquanto o terceiro eletrodo nominalmente idêntico aos dois eletrodos de trabalho, atua como um eletrodo de referência (Sánchez-Amaya et. Al., 2009; Blanco et. Al., 2019). O ruído eletroquímico pode ser caracterizado por parâmetros estatísticos comuns, como média, variância e desvio padrão; em particular, o uso do desvio padrão potencial / corrente pode ser feito separadamente ou por seu quociente. Chamada de resistência ao ruído (R_n), na expressão (2) é calculada como o quociente entre os desvios-padrão dos registros de intensidade de potencial e corrente (Sánchez et. Al., 2005; Bertocci et. Al., 1997).

$$R_n = \frac{\sigma V}{\sigma I} \quad (2)$$

Além do referido anteriormente, outro valor estatístico é utilizado para a análise do ruído atual, conforme a equação (3), que é a razão do desvio padrão com a raiz quadrada da média, denominado “índice de localização ou pitting” (LI ou IP), (Sánchez et. Al., 2005).

$$L.I = \frac{\sigma I}{rms} \quad (3)$$

A Tabela 4 mostra a faixa de valores do índice de localização que representa o tipo de corrosão na armadura.

Tabela 4. Valores de índice de localização.

Índice de localização	Tipo de corrosão
0.001 - 0.01	Generalizada
0.01 – 0.1	Mista
0.1 – 1	Localizada
> 1	Início dos pites

De acordo com as faixas de valores (Rincón e DURAR et. Al., 1997), a vida útil do concreto armado pode ser determinada a partir da densidade de corrente (i_{corr}) com os dados estabelecidos na Tabela 5.

Tabela 5. Nivel de vida útil no sistema aço/concreto.

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de corrosão
< 0.1	Desprezível
0.1 – 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevado
> 1	Muito elevado

2.3.3 Técnica de resistência da polarização linear

Para a medição da resistência à polarização linear, o mesmo s Gill AC-ACM Instruments foi usado, aplicou-se um pequeno sinal de tensão entre -50 mV e +50 mV no potencial de corrosão (ASTM G-59-97, 2014). O método de polarização linear, R_p , pode ser obtido graficamente através da expressão (4) como a tangente à curva de polarização em E_{corr} (Román et. Al., 2016).

$$R_p = \frac{dE}{di} \quad (4)$$

A partir da equação de Stern-Geary (5), a densidade de corrente de corrosão do i_{corr} foi relacionada ao R_p , por meio de uma constante de proporcionalidade B (Román et. Al., 2016). A constante B pode adquirir os valores de 0,026 V e 0,052 V, dependendo do tipo de sistema analisado (Sagües, 1991).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (5)$$

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

3.1 Caracterização por difração de raios X

A Figura 2 detalha os difractogramas de GP obtidos a partir de técnicas de XRD, um sólido policristalino com ajuste ordenado e uma intensidade de pico com valores de 2θ aproximadamente 26° e 27° é mostrado. Esses valores são semelhantes a alguns relatados por autores que descrevem o pico característico do grafite (Yuan et. Al., 2012). Existem 2 formas cristalinas diferentes de

carbono: hexagonal (2H) e romboédrico (3R).

A estrutura 2H é a forma mais comum nas fases identificadas com valores de 39,9% e a 3R com valores de 27,4%, com adição total de 67,3% no teor de carbono. A amostra contém 32,6% de componentes de argila, tais como: quartzo, filossilicatos esméticos, caulinita, mica.

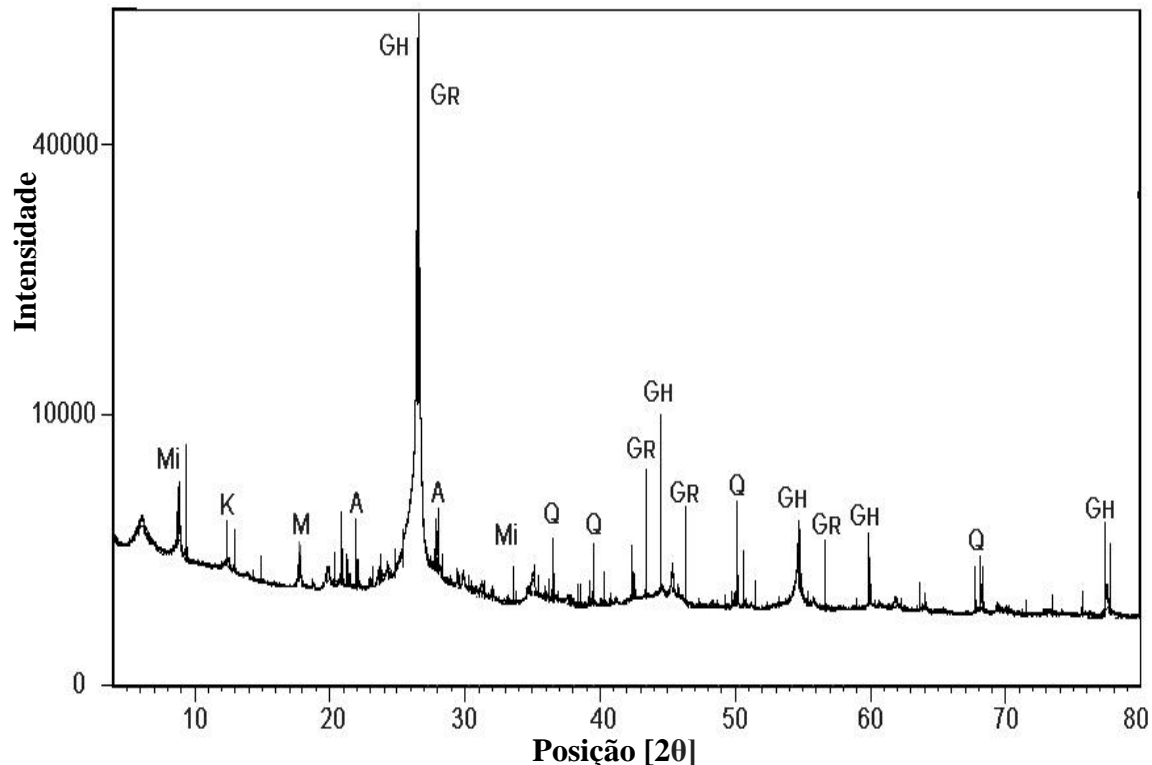


Figura 2. Difratogramas de raios -X de GP. Mi: mica; K: caulinita; M: montmorilonita; G_H: grafite (2H); G_R: grafite (3R); A: anortita; Q: Quartzo.

A Figura 3 corresponde aos difratogramas da amostra controle e com adição de GP, após um período de cura de 28 dias. O cimento hidratado de 28 dias produz as seguintes fases: silicato de cálcio hidratado (CSH) que é responsável pela aderência e resistência com ligantes, etringita (E) dá maior coesão ao cimento e portlandita (CH) mantém a alcalinidade, ou seja, o pH da massa em valores altos entre 12-13 (Helena e Lúcia, 2011; Giraldo e Tobón, 2006). A Figura 3a mostra as fases cristalinas de hidratação do concreto, observando-se picos elevados de quartzo (Q) e calcita (Ca); além de Dolomita (D) e plagioclásio ou Andesina (A). Os principais elementos abundantes que aparecem na amostra de controle são Q e Ca, devido à principal presença de calcário no cimento.

A Figura 3b), c) e d) mostra as amostras com diferentes percentuais de grafite, pois pode-se observar um pico de intensidade que não aumenta com o aumento da GP, o que mostra que há uma ausência de participação direta na hidratação da pasta do concreto. Observa-se que a análise de DRX não mostrou forte intensidade nos picos CH e CSH; Vários autores indicam que picos com valores 2θ de aproximadamente 29° podem ser atribuídos à fase CSH, e picos com valores 2θ de aproximadamente 18° e 34° podem ser atribuídos a CH (Giraldo e Tobón, 2006; Becerra, 2014). A ausência de portlandita no difratograma pode ser devido à amostra proveniente da superfície do cilindro, onde os efeitos da carbonatação podem obscurecer a identificação (Vetter et. Al., 2019).

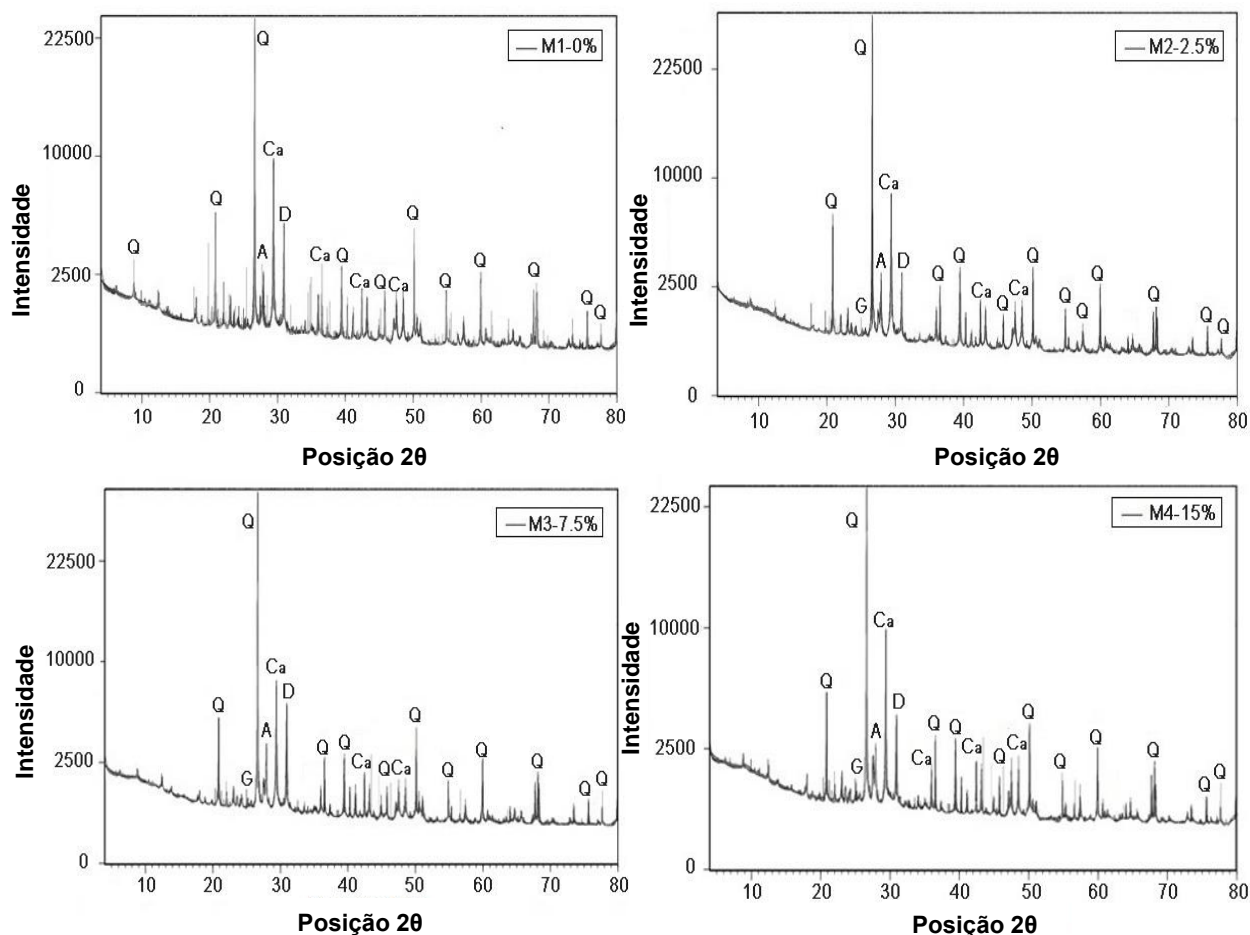


Figura 3. Difractogramas de raios X da pasta do concreto. a) M1-0%, b) M2-2.5% c) M3- 7.5% e d) M4-15%.Q: Quartzo; Ca: calcita; D: dolomita; G: grafite; A: andesine, curado por 28 dias.

3.2 Caracterização por microscópio eletrônico de varredura

As micrografias MEB do concreto são apresentadas na Figura 4, a análise visual da Figura 4a pertence à amostra controle M1, as microfissuras (m) são apreciadas na matriz da pasta, em decorrência da técnica de resistência à compressão e a extração da amostra. Juntos, foram observados silicatos de cálcio hidratado (CSH) e maior presença de portlandita (CH) e etringita (E). Para análise visual, os cristais E são alongados, geralmente em habitats fibrosos ou na forma de longos bastonetes. O HC normalmente ocorre na forma de finas plaquetas hexagonais, frequentemente décimos de um micrômetro de largura (Vetter et. Al., 2019).

A Figura 4b corresponde à micrografia da amostra M3 com 7,5% GP, visualiza-se uma estrutura compacta com maior formação de CSH, preenchendo os vazios da matriz de cimento, reduzindo a porosidade do concreto e melhorando a aderência sobre a partícula de carbono (GP).

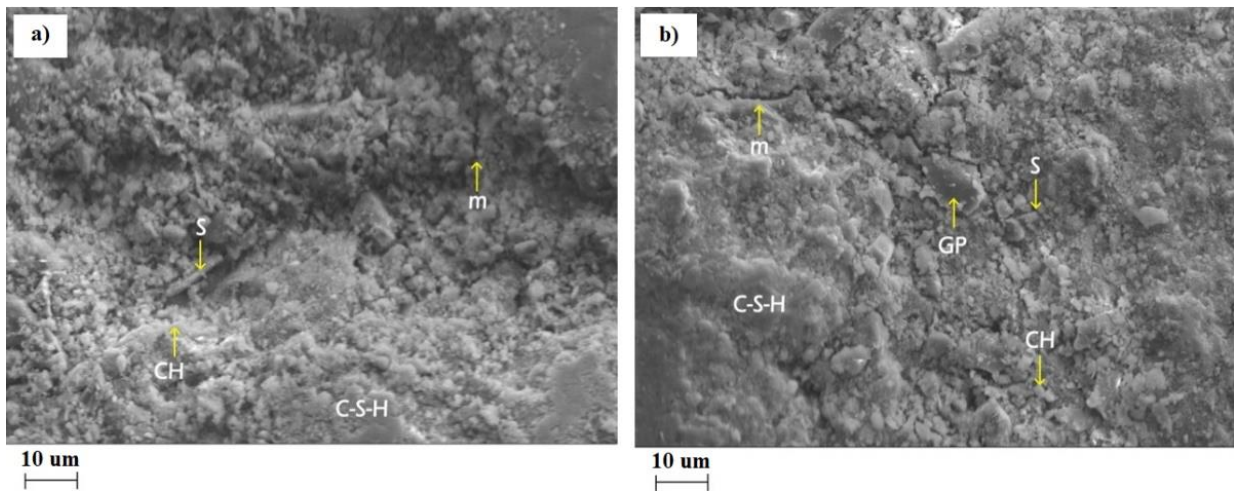


Figura 4. Micrografías MEB, a) M1-0% y b) M3-7.5% de GP, curado por 28 días.

3.3 Porosidade do concreto

A Tabela 6 mostra os valores percentuais de porosidade do concreto, pois pode-se observar que ao adicionar o teor de grafite em 2,5% em peso do cimento, a mistura adquire maior absorção de água e afeta a relação água / cimento em relação ao controle de amostra. A amostra M1 registra um percentual de porosidade de 22% com relação a / c de 0,59, os resultados mostram que no projeto M2 com 2,5% GP, a porosidade do concreto diminui em relação à amostra M1; as amostras M3 e M4 registram um maior aumento no a/c devido ao aumento na quantidade de água com valores de 0,61 e 0,81.

Em termos de durabilidade do concreto, o aumento da porosidade da pasta faz com que os agentes ambientais exijam que o material seja permeável para penetrar na massa do material; esses agentes também são auxiliados no seu transporte interno por difusão (Solís-Carcaño e Moreno, 2006).

Tabela 6. Porosidade do concreto.

Amostras	a/c	Porosidade (%)
M1-0	0.59	22.00
M2-2.5	0.61	19.30
M3-7.5	0.69	20.80
M4-15	0.81	24.80

3.4 Resistencia à compressão

A Tabela 7 mostra os valores médios de resistência à compressão (f'_c) após 7, 14 e 28 dias de cura. A amostra controle M1-0 foi projetada para uma resistência teórica de 250 kg/cm², durante os 28 dias de cura. Adquiriu uma resistência experimental máxima média de 258 kg/cm², excedendo o valor teórico de projeto. A amostra M2 com 2,5% GP mostra um aumento da resistência à compressão em idade precoce de 7 dias com um valor de 242 kg/cm². Durante os 28 dias de cura, a resistência à compressão aumentou 4,6% em relação à resistência da amostra de controle. A amostra M3 com 7,5% de GP, durante os dias de cura observa-se um aumento constante de f'_c , atingindo uma resistência final à compressão de 267 kg/cm²; a amostra M4 com 15% de GP apresenta baixa f'_c com valor de 244 kg/cm², devido ao aumento da quantidade de água adicionada.

Tabela 7. Valores de resistência à compressão (f'_c).

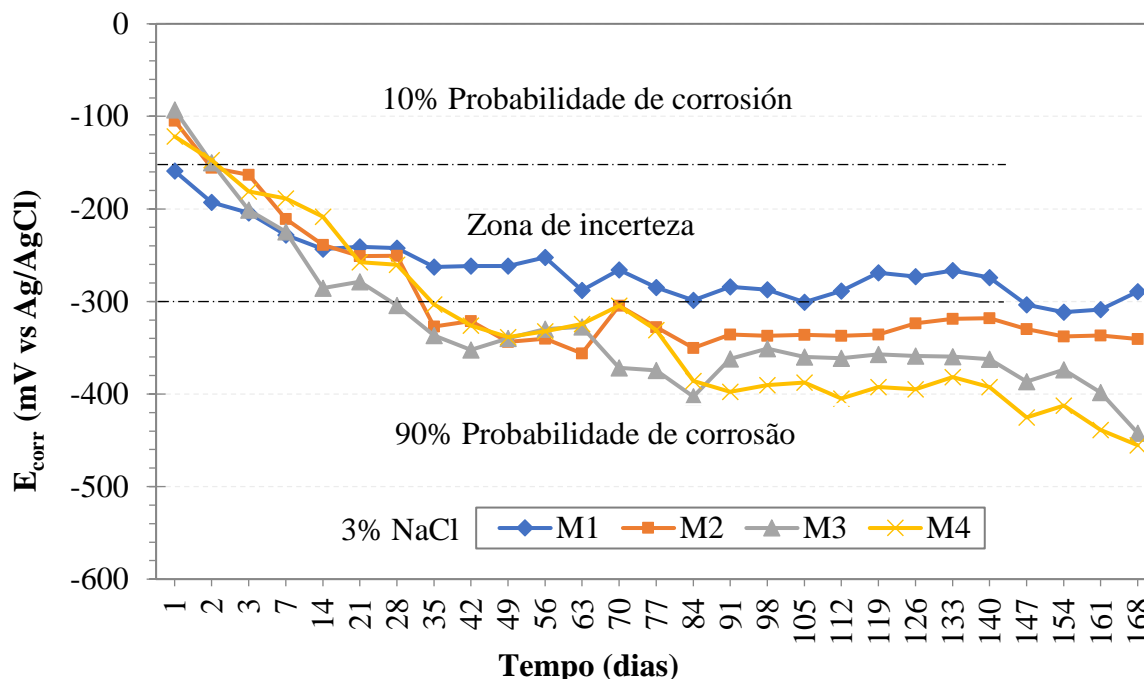
Amostras	Resistência à compressão (kg/cm ²)		
	7 dias	14 dias	28 dias
M1-0	181.5	235.9	257.7
M2-2.5	242.0	267.3	271.5
M3-7.5	199.9	241.8	266.8
M4-15	188.9	222.1	244.2

3.5 Potencial de meia célula

Após 168 dias imersos em solução salina a 3% de cloreto de sódio (NaCl), os resultados do potencial de corrosão (E_{corr}) estão detalhados na Figura 5. Observou-se diminuição do potencial nos primeiros dias para todas as amostras, adquirindo mais valores negativos entre -100 mV e -250 mV, estimando uma probabilidade de 10 por cento para a zona de incerteza. A resistividade do concreto e o oxigênio nos poros da matriz do concreto são fatores que influenciam os valores de potencial (Castellote et. Al., 2002). GP é um material condutor adicionado ao concreto; deve envolver a redução da resistividade elétrica e o aumento do transporte de íons cloreto, causando a formação de óxido não protetor no metal. Como existem dois materiais condutores como o aço da armadura e o GP, indica que o material menos nobre desenvolverá um maior nível de corrosão. Este fato mostra porque os valores negativos do potencial de corrosão nas amostras de GP.

Com o passar do tempo, todas as amostras com adição de GP tiveram uma diminuição mais negativa nos valores potenciais, entrando em uma zona de 90% de probabilidade de corrosão. Entre os dias 84 e 148, podem ser observados valores de potencial de corrosão constantes, entre -280 mV e -400 mV, indicando a possível formação de camadas densas de óxido não protetoras no aço.

Todas as amostras ao final do experimento no dia 168 de imersão, estão localizadas na zona de 90% de probabilidade de corrosão, a amostra M4 com 15% de GP, é aquela com o valor potencial mais negativo de -460 mV devido à aos fatores descritos acima e também à quantidade de água adicionada.

Figura 5. Valores de potencial de corrosão (E_{corr}).

3.6 Ruído eletroquímico

A média das oscilações da resistência ao ruído eletroquímico é apresentada na figura 6. No início da medição, todas as amostras apresentavam baixos valores de R_n entre $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$; durante os dias 28 e 70. As amostras M1 e M3 apresentam altas e baixas flutuações de R_n , possivelmente devido à formação de filmes de óxidos não protetores, mantendo o metal passivo. Ao final do dia 168 de exposição ao meio salino, todas as amostras mantêm valores baixos de resistência ao ruído em torno de $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

A adição de GP na pasta de concreto em diferentes percentuais afeta as propriedades eletroquímicas do metal, adquirindo valores de R_n muito baixos, este evento pode ser explicado pela alteração do oxigênio na interface aço/concreto, em decorrência da alteração na porcentagem de porosidade da pasta. Além disso, o conteúdo de GP diminui a resistividade do concreto; com valores de R_n mais baixos indica um processo de alta corrosão do metal ao longo do tempo (Zhao et. al., 2007).

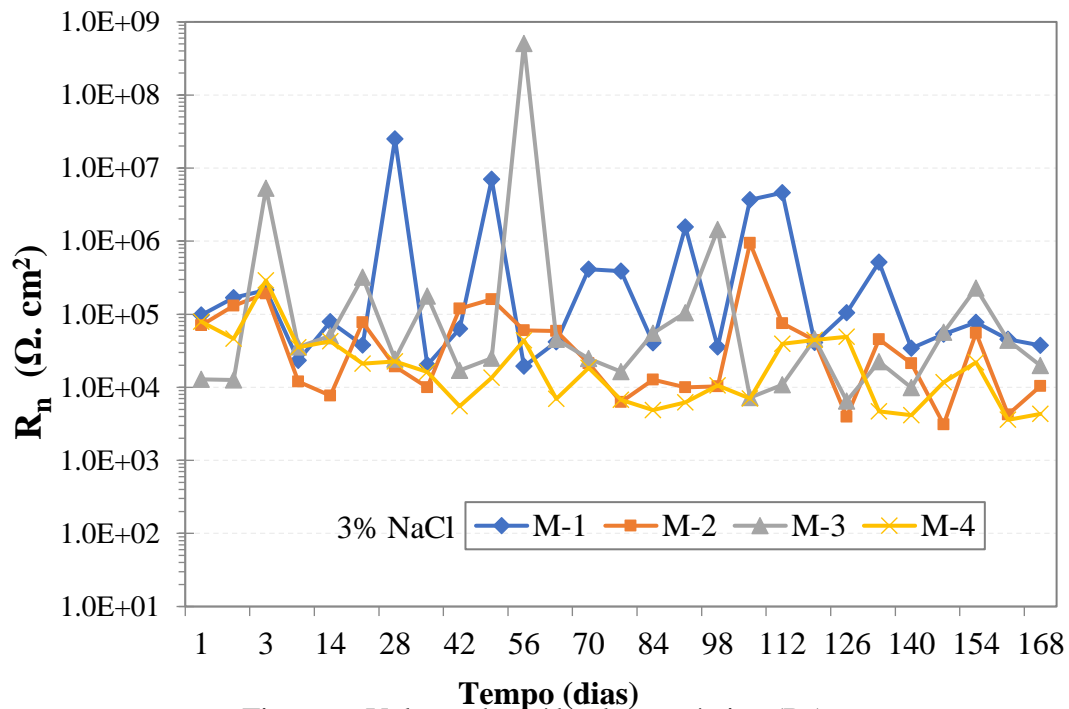


Figura 6. Valores de ruído eletroquímico (R_n).

Os valores do índice de localização são mostrados na Figura 7, do início do ensaio até o final da exposição. Eventos localizados ou corrosão podem ser observados, devido à alta taxa de dissolução do metal em pontos discretos de sua superfície (Sanz et. Al., 1999). Este representa um maior risco potencial, devido à sua difícil detecção, visto que se manifesta em áreas específicas (Salazar-Jiménez, 2015). Se o tempo de exposição for prolongado, o início da corrosão pode ocorrer no metal.

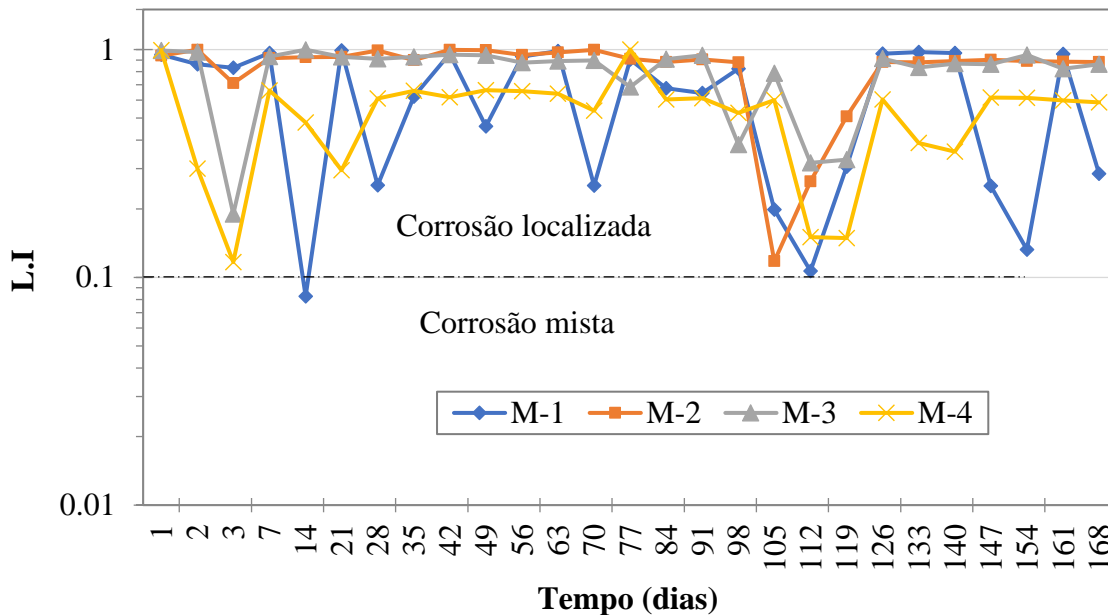


Figura 7. Valores de índice de localização do aço da armadura.

Os valores da vida útil do concreto armado são detalhados na Figura 8, onde todas as amostras foram registradas no momento da imersão em meio salino após 24 horas. Podem ser observados valores de i_{corr} muito elevados entre 0,1 e 0,5 $\mu A/cm^2$, apresentando uma faixa de corrosão entre moderada e muito alta. Este comportamento coincide com os valores negativos do ensaio de potencial de corrosão. As amostras com nível de substituição de GP, respectivamente, apresentam valores de i_{corr} muito elevados, como pode ser visto, e aumentam com o tempo, demonstrando uma corrosão muito elevada na armadura e na vida útil do concreto.

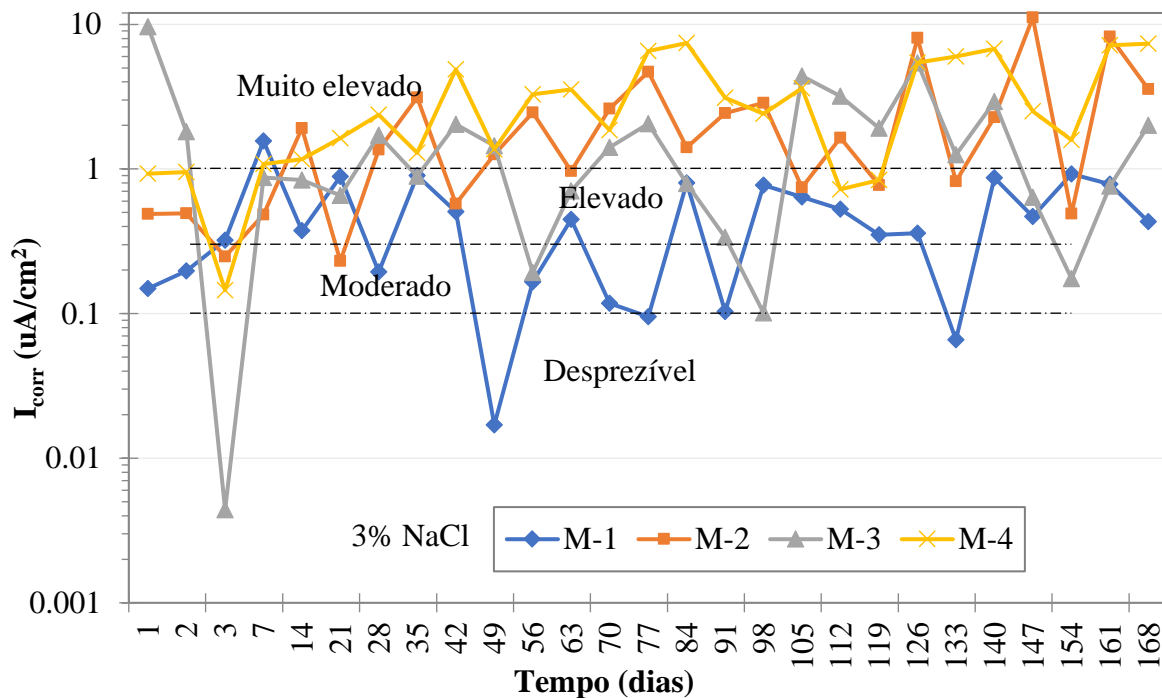


Figura 8. Nível de vida útil do concreto armado.

3.7 Resistência à polarização linear

A Figura 9 mostra os valores de resistência de polarização ao longo do tempo, valores muito baixos de R_p podem ser observados, nas 24 horas de imersão e até o final da medição no experimento RPL. Durante os dias 42 e 70 há um aumento no R_p das amostras M1 e M2, talvez possa indicar uma diminuição na taxa de corrosão do metal, os altos valores de R_p são uma indicação de que o aço é passivo (Blanco et. Al., 2019). Amostras com quantidade de GP, adquiriram valores constantes entre $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$; Alta interação com íons cloreto pode ocorrer na interface aço/concreto, registrando valores de R_p muito baixos. É demonstrado que os íons de cloreto despassivaram o metal e o material apresenta alta corrosão em certos momentos conforme o tempo de imersão avança.

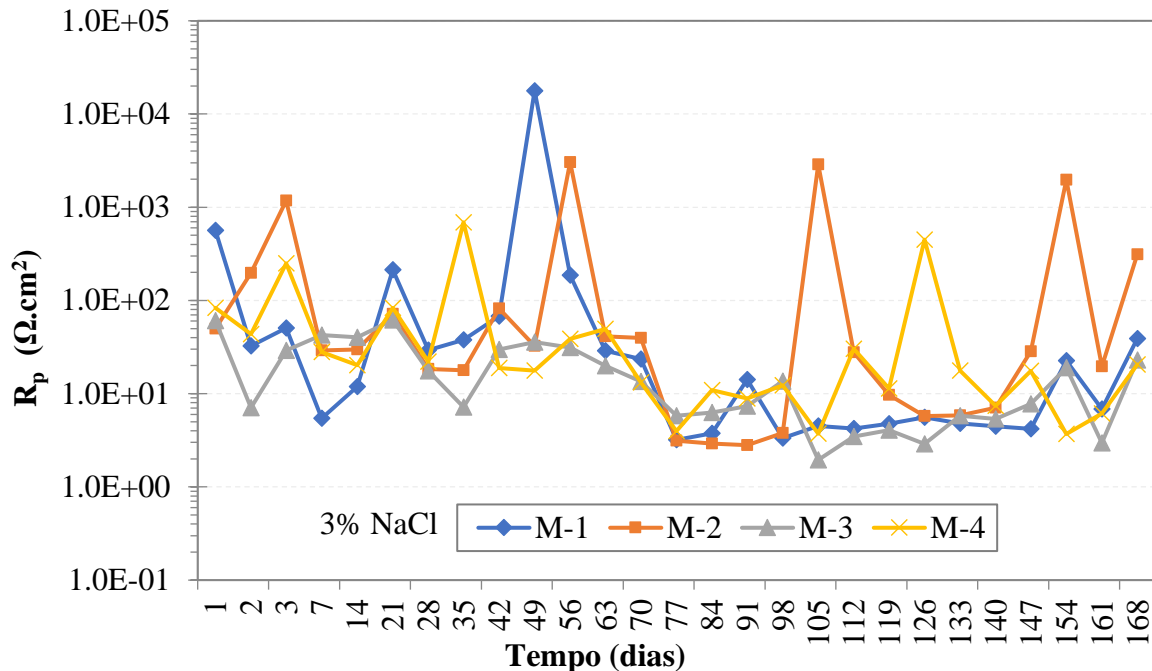


Figura 9. Valores de resistência à polarização (R_p) ao decorrer do tempo.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho e no âmbito desta pesquisa, podem-se tirar as seguintes conclusões:

No ensaio de resistência à compressão, a amostra M2 com 2,5% de GP apresentou um alto valor nas propriedades mecânicas do concreto em relação à amostra controle, mas o percentual de porosidade na pasta de concreto diminuiu; esse fato pode ser devido à absorção de água pelas partículas de GP na matriz do concreto.

Nas amostras com adição de 7,5% e 15% de GP, foi necessário um maior teor de água aumentando a relação a/c.

Nas técnicas de DRX, o GP adicionado ao concreto não teve interação no processo das fases cristalinas de hidratação do concreto.

Todas as amostras imersas em meio salino apresentaram potencial de corrosão negativo com valores entre -290 mV e -450 mV, entrando em uma zona de 90% de probabilidade de corrosão.

Nas medidas eletroquímicas das amostras, eles apresentaram valores baixos de R_n e R_p , entre $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$; indicando um processo de alta corrosão no aço da armadura.

O nível de vida útil do concreto armado com adição de GP, apresentou um nível de corrosão entre alto e muito alto com valores de densidade de corrente (I_{corr}) superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

O tipo de corrosão para as barras de aço da armadura esteve na faixa da corrosão localizada, desde os primeiros dias de imersão e constantemente com o avanço do tempo de exposição ao meio salino, com valores de índice de localização entre 0,1 e 1.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2002) “ACI. 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” (Reapproved 2009),1-38.
- ASTM International. (2019). “ASTM C31 / C31M-19a, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field” https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-19A
- ASTM International. (2020). “ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20
- ASTM International. (2020). “ASTM C150 / C150M-20, Standard Specification for Portland Cement”. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-20
- ASTM International. (2017). “ASTM C231 / C231M-17a, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”.https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17a
- ASTM International. (2009). “ASTM C876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”.<https://doi.org/10.1520/C0876-09>
- ASTM International. (2014). “ASTM G59-97, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”. <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>
- Becerra, J. (2014). “Efectos de la sílice amorfa en las propiedades cristalógicas y mecánicas del hormigón en un medio salino”. Thesis, Universidad Austral de Chile, p. 76.
- Berkeley, K. G., Pathmanaban, S. (1990), “Cathodic protección of reinforcement steel in concrete”, Ed. Butterworths, United Kingdom, ISBN 0-408-03270-1.
- Bertocci, U., Gabrielli, C., Huet, F., & Keddam, M. (1997). “Noise resistance applied to corrosion measurements: I. Theoretical analysis”. Journal of the Electrochemical Society, 144(1), 31.
- Blanco, Y. D., Campos, E. C. M., Valdés, C. I. R., Uruchurtu, C. J. (2019). “Natural additive (nopal mucilage) on the electrochemical properties of concrete reinforcing steel”. Revista ALCONPAT, 9(3), 260-276. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>
- Castellote, M., Andrade, C., Alonso, C. (2002) “Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the nonstationary diffusion coefficient values”, Corrosion Science, 44, 2409-2424, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00060-4)
- Chess, P., Gronvold and Karnov, (1998), “Cathodic protección of steel in concrete”, E&FN Spon, United Kingdom, ISBN 0-419-23010-6.
- Chung, D. D. L. (2000). “Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material”. Composites Part B: Engineering, 31(6-7), 511-526. doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00071-2)
- Garcés, P., Andión, L. G., De la Varga, I., Catalá, G., Zornoza, E. (2007). “Corrosion of steel reinforcement in structural concrete with carbon material addition”. Corrosion science, 49(6), 2557-2566. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.12.009>
- Giraldo, M. A., Tobón, J. I. (2006). “Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación”. Dyna, 73(148), 69-81.
- Goellner., J. (2004). “Elektrochemisches Rauschen bei der Korrosion”, Werkstoffe und Korrosion, Vol. 55, pp. 727-734, doi: <https://doi.org/10.1002/maco.200403810>

- González, J., & Jimmy, R. (2003). *“Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado para Aplicaciones Portuarias”* (Doctoral dissertation, Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral).
- Ha, T. H., Muralidharan, S., Bae, J. H., Ha, Y. C., Lee, H. G., Park, K. W., Kim, D. K. (2005). *“Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar”*. Construction and Building Materials, 19(7), 509-515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.005>
- Helena, J., Lucia, M. D. (2011). *“X-ray diffraction study of hydration processes in the Portland cement”*. Journal of Applied Engineering Science, 1(1), 79-86.
- Heymsfield, E., Osweiler, A. B., Selvam, R. P., Kuss, M. (2013). *“Feasibility of anti-icing airfield pavements using conductive concrete and renewable solar energy”*. (No.DOT/FAA/TC-13/8).
- O.T. de Rincón y Miembros de la red DURAR, *“Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”*, CYTED. Maracaibo, Venezuela, 1997 (1era.Ed).
- Román, A. S., Barrientos, M. S., Harms, F., Mendez, C. M., Ares, A. E. (2016, April). *“Resistencia corrosión de acero inoxidable AISI 304L en biodiesel de soja”*. In ANALES AFA (Vol. 27, No. 1). doi: <https://doi.org/10.31527/analesafa.2016.27.1.14>
- Sagües, A. A. (1991). *“Critical Issues in Electrochemical Corrosion Measurement. Techniques for Steel in Concrete”*. CORROSION/91, NACE. Paper 141.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). *“Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales”*. Revista Tecnología en Marcha, 28(3), 127-136.
- Sánchez, A., Sanjurjo, M., Bouzada, F., Urrejola, S. (2005). *“Análisis estadístico de los registros de ruido electroquímico obtenidos en la corrosión del aluminio”*. Revista de metalurgia, 41(5), 330-339. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.i5.222>
- Sánchez-Amaya, J. M., Bethencourt, M., Gonzalez-Rovira, L., Botana, F. J. (2009). *“Medida de ruido electroquímico para el estudio de procesos de corrosión de aleaciones metálicas”*. Revista de metalurgia, 45(2), 142-156. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0807>
- Sanz, J. L. P., Torres, C. L., Cano, E., Bastidas, J. M. (1999). *“Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasiva y de picadura”*. Revista de metalurgia, 35(6), 368-378. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1999.v35.i6.645>
- Solís-Carcaño, R., Moreno, E. I. (2006). *“Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo”*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV, 21(3), 57-68.
- Tascón, J. M. (2007). *“Materiales de carbono: estructuras y formas. Óptica pura y aplicada”*. 40(2),149-159.
- Vetter, M., Gonzalez-Rodriguez, J., Nauha, E., Kerr, T. (2019). *“The use of Raman spectroscopy to monitor phase changes in concrete following high temperature exposure”*. Construction and Building Materials, 204, 450-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.165>
- Vidaud, E., & Vidaud, I. (2012). *“La carbonatación en el concreto reforzado”*, Construcción y tecnología en concreto. Pág, 21-23.
- Wu, S. P., Wang, P., Li, B., Pang, L., Guo, F. (2014). *“Study on mechanical and thermal properties of graphite modified cement concrete”*. In Key Engineering Materials (Vol. 599, pp. 84-88). Trans Tech Publications Ltd. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.84>
- Yuan, H. W., Lu, C. H., Xu, Z. Z., Ni, Y. R., Lan, X. H. (2012). *“Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials”*. Solar energy, 86(11), 3227-3233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.011>
- Zhao, B., Li, J. H., Hu, R. G., Du, R. G., Lin, C. J. (2007). *“Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in cement mortar by electrochemical noise measurements”*. Electrochimica Acta, 52(12), 3976-3984. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.11.015>

Análise comparativa da eficácia e eficiência de três sistemas impermeabilizantes

I R. S. Kmick¹, M. G. Gazolla¹, R. M. da Silva Junior¹,

A. P. B. Capraro^{*2}, K. A. W. Moreira¹

* Autor de Contato: anapcapraro@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.509>

Recepção: 11/09/2020 | Aceitação: 30/10/2020 | Publicação: 01/01/2020

RESUMO

O objetivo desse estudo foi analisar comparativamente sistemas de impermeabilização empregados no mercado brasileiro. Os produtos avaliados foram: emulsão asfáltica, resina acrílica e resina termoplástica. Para avaliação da eficácia dos sistemas foram realizados os ensaios de estanqueidade, absorção por imersão e capilaridade, sendo esse último também analisado por imagens termográficas. Para a análise da eficiência dos sistemas foi adotado um padrão de envelhecimento acelerado, o qual consistiu na alternância das amostras em ciclos de molhagem e secagem. Os resultados indicam um bom desempenho para os sistemas estudados, que quando comparados a série não impermeabilizada apresentaram absorções inferiores (aproximadamente 300%). Já o ensaio de envelhecimento acelerado indicou, posteriormente aos 140 dias de idade, redução do desempenho das séries impermeabilizadas.

Palavras-chave: sistemas de impermeabilização; eficácia; eficiência; envelhecimento acelerado; redução de desempenho.

Citar como: Kmick, R. S., Gazolla, M. G., da Silva Junior, R. M., Capraro, A. P. B., Moreira, K. A. W. (2021), "Análise comparativa da eficácia e eficiência de três sistemas impermeabilizantes", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 34 – 47, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.509>

¹ Engenharia Civil, Centro Universitário Araucária, Araucária, Brasil.

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

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores Renata dos Santos Kmick, Micheli Gazolla e Renato Moura da Silva Junior contribuíram com a discussão da ideia original e com o desenvolvimento de ensaios e coleta de dados. A autora Ana Paula Brandão Capraro contribuiu com a discussão da ideia original, redação do trabalho e discussão de resultados. O autor Kirke Moreira contribuiu com a coleta de dados e redação do trabalho.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Comparative analysis of the effectiveness and efficiency of three waterproofing systems

ABSTRACT

The objective of this study was to comparatively analyze waterproofing systems used in Brazil. The evaluated products were: asphalt emulsion, acrylic resin and thermoplastic resin. In order to evaluate the effectiveness of the systems the tests measured the tightness and the absorption by immersion and capillarity, the last one was also analyzed by thermographic images. For the systems efficiency analysis an accelerated aging pattern was adopted, which consisted of alternating the samples in wet and dry cycles. The results indicate a good performance for the studied systems, in comparison to the non-impermeable series, it presented lower absorbance (approximately 300%). The accelerated aging test indicated, after 140 days of age, a reduction in the performance of the waterproofed serie.

Keywords: waterproofing systems; effectiveness; efficiency; accelerated aging; yield reduction.

Análisis comparativo de la efectividad y eficiencia de tres sistemas de impermeabilización

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar comparativamente los sistemas de impermeabilización empleados en el mercado brasileño. Los productos evaluados fueron: emulsión de asfalto, resina acrílica y resina termoplástica. Para evaluar la efectividad de los sistemas, se realizaron pruebas de estanqueidad, absorción por inmersión y capilaridad, siendo este último también analizado por imágenes termográficas. Para el análisis de eficiencia de los sistemas, se adoptó un patrón de envejecimiento acelerado, que consistía en alternar las muestras en ciclos húmedos y secos. Los resultados indican un buen desempeño para los sistemas estudiados, que en comparación con las series no impermeables presentaron absorbancias más bajas (aproximadamente 300%). La prueba de envejecimiento acelerado indicó, después de 140 días de edad, una reducción en el rendimiento de la serie impermeabilizada.

Palabras clave: sistemas de impermeabilización; efectividad; eficiencia; envejecimiento acelerado; reducción de rendimiento.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de impermeabilização são essenciais para assegurar a durabilidade de qualquer construção e negligenciá-los pode trazer como resultado a infiltração, a qual propicia mecanismos patológicos como a lixiviação, degradação do concreto, corrosão de armaduras e bolhas em revestimentos (Aldea e Shah, 1999).

Um material considerado impermeável é aquele que impede a passagem de água de um plano para o outro. Ou ainda, um substrato que não absorva mais que 2,5% de umidade quando comparado a uma amostra referência (Basheer *et al.*, 2001).

A falta de informação a respeito das técnicas e o uso de materiais inadequados, entre outros fatores, por muito tempo foram os responsáveis pelos os insucessos na impermeabilização (PICCHI, 1986). O custo de uma impermeabilização bem concebida e executada pode representar 1% a 3% do valor de uma obra. Prejuízos advindos dos custos de manutenção de um imóvel podem chegar de 5% a 10% do valor do empreendimento (Bauer *et al.*, 2010).

Novas normas, como é o caso da NBR 15575 (ABNT, 2013), e atualizações de normas existentes veem direcionando as recomendações ao atendimento das necessidades e desempenhos das edificações, exigindo-se que todos os sistemas habitacionais atendam um nível mínimo de desempenho ao longo da vida útil determinada em projeto (VUP).

O sistema de impermeabilização atualmente mais empregado é o que faz uso de manta asfáltica (Menezes, 2018), porém, os fabricantes têm investido bastante em pesquisas de desenvolvimento de novos produtos, ampliando o mercado e trazendo o benefício da durabilidade nas obras, com redução de custos.

De acordo com Andrello e Takagi (2017), aplicando um produto com maior desempenho, economiza-se na aplicação e na manutenção da edificação. Ainda, segundo o mesmo autor, os fabricantes têm produtos com a mesma finalidade, porém, as características mudam de produto para produto. Se o consumidor ou o aplicador não der atenção para isso poderá aplicar um produto de forma igual para todos os casos, não atingindo, dessa forma, o desempenho esperado.

Levando em consideração o exposto, o presente estudo teve por objetivo a análise comparativa da eficácia e eficiência de três sistemas impermeabilizantes, disponíveis no mercado, e recomendados, pelos seus fabricantes, para serem utilizados em laje cobertura não transitável. Para a análise da eficácia dos sistemas impermeabilizantes, ou seja, do sucesso do sistema como camada estanque ao concreto, foram realizados os ensaios de estanqueidade (NBR 15575-3, 2013), absorção por imersão (NBR 9778, 2005) e absorção por capilaridade (NBR 9779, 2012) em idade inicial, logo após a cura dos sistemas aplicados. Para a análise da eficiência do sistema, ou seja, do desempenho ao longo do tempo, foram realizados os mesmos ensaios de absorção por imersão (NBR 9778, 2005) e absorção por capilaridade (NBR 9779, 2012), contudo, após a exposição das amostras em ciclos de molhagem e secagem, visando representar um ciclo de envelhecimento acelerado dos sistemas.

2. METODOLOGIA

Este estudo contou com a realização de um programa experimental, com a confecção de amostras de concreto e proteção das mesmas com os materiais impermeabilizantes a serem avaliados.

2.1 Materiais impermeabilizantes

Para a escolha dos três produtos impermeabilizantes empregados na presente pesquisa foram levados em consideração: (i) o local de aplicação, sendo este recomendado para o mesmo fim entre os três produtos, recomendação está feita pelos fabricantes; (ii) os produtos serem normatizados; (iii) e a classificação, quanto a vida útil, pelo IBI (Instituto Brasileiro de Impermeabilização), sendo escolhidas três faixas distintas de vida útil esperada.

Foram então escolhidas três membranas, as quais atenderam aos critérios de fabricação e aplicação das normas NBR 9685 (ABNT, 2005), NBR 13321 (ABNT, 2008), NBR 15885 (ABNT, 2010) e aos critérios de vida útil do IBI, citados por Morgado *et al.* (2018). Os produtos, suas respectivas normas e vida úteis estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Produtos impermeabilizantes empregados na pesquisa.

Grupo dos Produtos	Membranas		
Norma (ABNT, NBR)	9685:2005	13321:2008	15885:2010
Produtos	Emulsão Asfáltica	Membrana Acrílica	Resina Polimérica
Vida útil (IBI)	8	16	26

A membrana de emulsão asfáltica tem como base asfalto modificado com polímeros e é emulsionado em água, pronto para o uso e não agressivo ao meio ambiente. Segundo o fabricante, mantido em sigilo por questões éticas, suas características são: a boa performance de elasticidade e flexibilidade, a aderência, o fácil manuseio e a aplicação. O produto pode ser aplicado em ambientes fechados, formando uma membrana contínua e sem emendas, com resistência e durabilidade. Seu uso pode ser em terraços, jardineiras e floreiras, muros de contenção, saunas, câmaras frigoríficas, calhas, lajes de pequenas dimensões, paredes e pisos frios.

A membrana de resina acrílica é um material monocomponente, aplicável a frio e pronto para o uso. Devido as suas características, citadas pelo fabricante, também mantido em sigilo, é considerado um excelente impermeabilizante e de boa durabilidade, fácil aplicação, boa elasticidade, resistente aos raios U.V, com boa aderência em substratos cimentícios e fibrocimento e reflete raios solares, reduzindo parte do calor absorvido pela estrutura. Sua aplicação pode ser em coberturas abobadadas e inclinadas, lajes de concreto, calhas de concreto, varandas e terraços, coberturas de reservatórios e telhas de fibrocimento.

A resina termoplástica é um impermeabilizante flexível, bi componente, à base de polímeros acrílicos com cimento e reforçado com fibras, especialmente indicado para estruturas sujeitas à movimentação. É recomendado o uso em estruturas hidráulicas e que tenha contato com água potável, áreas molhadas como banheiros, sacada e fachadas, lajes de cobertura com tráfego eventual e com suas devidas juntas de dilatação, piscinas e reservatórios, floreiras e jardineiras, entre outros. Apresenta alta flexibilidade e alongamento, podendo ficar exposto ao tempo (resistente ao U.V) e resistente a altas pressões hidrostáticas positivas. Ainda, segundo o fabricante, possui fácil e rápida aplicação podendo ser aplicação manual ou projetada, não necessitando de cura.

A descrição dos produtos impermeabilizantes que foram utilizados na pesquisa está disposta na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos produtos impermeabilizantes empregados na pesquisa.

Produto	Componentes	Características
Emulsão Asfáltica	Asfalto (40-70% de concentração)	Densidade: 0,95 a 1,05 g/cm ³ Viscosidade: 9.000 a 12.000 Cps Cor: Preto
Membrana Acrílica	Água, cargas minerais, emulsão acrílica, pigmento, estabilizantes, antiespumante, biocida.	Densidade: 1,2 g/cm ³ Viscosidade: 1000 a 2500 Cps Cor: Branco
Resina Termoplástica	Polímeros Acrílicos (Resina Termoplástica), Cimento Portland (25 - 50% de concentração)	Densidade: 1,60g/cm ³ Cor: Cinza

2.2 Moldagem das amostras

As amostras empregadas no estudo foram confeccionadas com concreto de cimento Portland CPV-ARI, resistência de 35 MPa, traço base 1:1:6 com relação água/cimento de 0,495. O cimento empregado possui massa específica de 3,13 g/cm³, o agregado miúdo possui a dimensão máxima 2,4mm e massa específica de 2,62 g/cm³ e o agregado graúdo empregado foi uma brita 1, de massa específica igual a 2,65 g/cm³.

Para a análise de desempenho dos produtos foram moldados 32 corpos de provas cilíndricos 0,10x0,20m e 4 lajes, com dimensões de 0,6x0,6x0,07m. Após a cura de 28 dias do concreto das amostras foi realizada a aplicação dos produtos, conforme as orientações das fichas técnicas (Tabela 3).

Tabela 3. Aplicação dos produtos impermeabilizantes empregados na pesquisa.

Produto	Especificação	Intervalos	Tempo de Secagem
Emulsão Asfáltica	2 a 3 demãos	12 horas	5 dias
Membrana Acrílica	3 a 4 demãos	6 horas	1 dias
Resina Termoplástica	Espessura entre 2 a 4mm	6 horas	7 dias

2.3 Análise experimental

As amostras de concreto moldadas foram submetidas a ensaios experimentais, os quais tiveram por objetivo avaliar a eficácia e a eficiência do produto empregado como impermeabilizante.

Para a análise da eficácia dos sistemas, ou seja, desempenho inicial dos produtos quando comparados a série referência, está sem nenhuma proteção, foram realizados os ensaios de teste de estanqueidade, absorção por imersão e absorção por capilaridade.

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão e absorção por capilaridade, que são qualitativos por apresentarem diferenças percentuais de absorção, foram analisados estatisticamente, por meio do teste de Tukey, com 95% de confiança. O teste tem por objetivo apontar a menor diferença significativa, estatisticamente, entre os dados analisados. Assim sendo, com o intervalo de 95% de confiança, as séries (referência e as três impermeabilizadas) foram comparadas, a fim de ser avaliada a diferença estatística entre elas nos ensaios quantitativos realizados.

Para o teste de estanqueidade foram utilizadas as quatro lajes, sendo três delas com os produtos selecionados para a pesquisa e uma para comparação de comportamento sem proteção, sendo a amostra referência. As lajes foram submetidas ao teste de estanqueidade, sendo elas expostas a uma lâmina de água de 0,03m por 72 horas, através de um recipiente transparente e vedado, conforme recomendação da Anexo C NBR 15575-3 (ABNT, 2013), Figura 1.



Figura 1. Teste de estanqueidade realizado em laboratório.

Em paralelo foram utilizados 12 corpos de prova 10x20cm para a realização do ensaio de absorção por imersão, de acordo com a NBR 9778 (ABNT,2005), sendo 3 com aplicação dos produtos e 3 para a série referência, sem aplicação. Após a aplicação e secagem dos produtos, os corpos de provas foram levados a estufa por 72 horas, a 40°C. A temperatura da secagem foi assim adotada para evitar uma solitação que os materiais não resistiriam. Após a secagem, foram registradas as massas das amostras secas e, posteriormente aos períodos de imersão (24, 48 e 72 horas), foram também registradas as massas das amostras imersas.

Ainda, foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade, conforme NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram utilizados 20 corpos de prova, sendo 5 impermeabilizados pela metade, com cada impermeabilizante e 5 como referência, sem aplicação de produto. Foi realizada a impermeabilização somente da parte inferior por ser a parte da amostra em contato com a água durante o ensaio. Após o tempo de secagem dos produtos, os corpos de provas foram levados à estufa sob temperatura de 40°C pelo período 72 horas e resfriados a temperatura ambiente por 24 horas. Após a determinação da massa seca, os corpos de prova foram levados a um suporte e expostos há uma lâmina de água constante de 10mm. Durante o ensaio foi determinada a massa saturada dos corpos de provas em intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Após a determinação das massas, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, para permitir medição da distribuição da água no seu interior com a utilização de termografia infravermelha.

Para a avaliação da eficiência dos produtos, ou seja, do desempenho deles ao longo do tempo, foi adotada uma condição de envelhecimento acelerado, a qual consistiu na ciclagem semanal dos corpos de prova cilíndricos empregados no ensaio de absorção por imersão. O ciclo adotado alternou as amostras entre uma condição de molhagem (imersão) e secagem (exposição ao sol e a intempéries). O padrão de envelhecimento foi assim adotado por já ter sido utilizado em outros trabalhos que buscaram o aceleração do envelhecimento (Gao *et al.*, 2013; Gong *et al.*, 2016; Jiang e Niu, 2016).

As amostras empregadas na análise do envelhecimento acelerado foram sujeitas a três conjuntos de ciclos, sendo cada um composto por 8 ciclagens (8 semanas), sendo as idades de análise 84, 140 e 196 dias. Nas idades mencionadas os corpos de provas foram sujeitos aos procedimentos mencionados no ensaio de absorção por imersão.

3. RESULTADOS

3.1 Estanqueidade

Após a submissão das lajes ao teste de estanqueidade, as mesmas foram observadas por 72 horas. Contudo, no período avaliado, o qual é o recomendado pela NBR 15575 (ABNT, 2013), não foi constatado o aparecimento de bolhas, infiltração na parte inferior das lajes e nem rebaixamento do nível da água na referência de 0,03m. A Figura 2 apresenta parte das quatro lajes estudadas, indicando a estanqueidade de todos os sistemas.

Cabe destacar que como todas as lajes foram consideradas estanques, não foi atestada diferença comportamental, passível de ser identificada por este ensaio, entre a amostra referência (sem proteção) e as amostras impermeabilizadas.

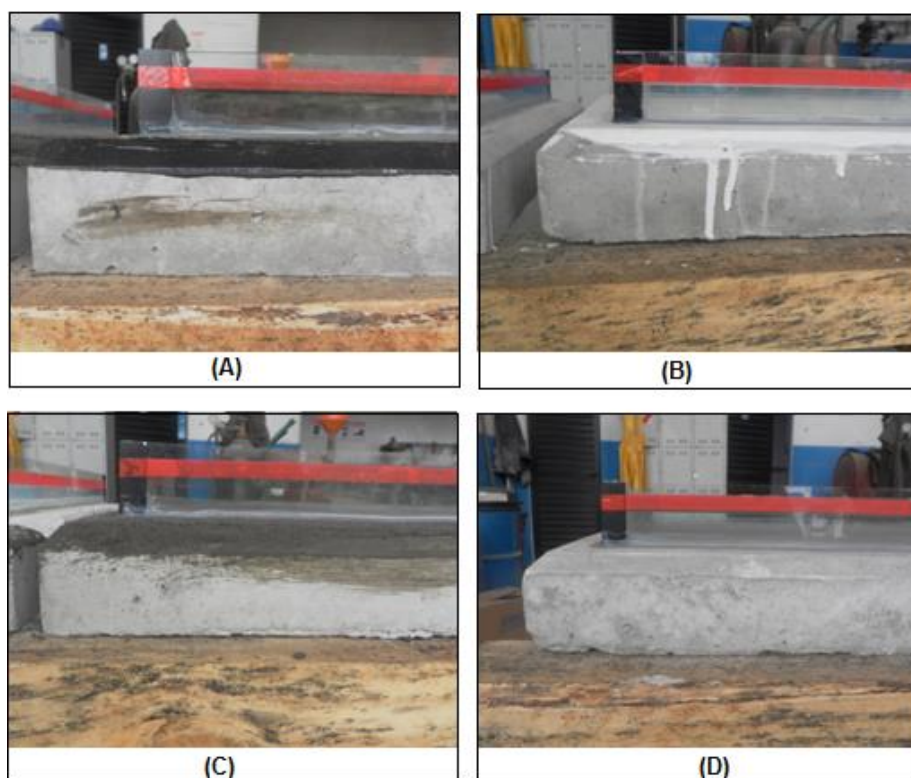


Figura 2. Resultado do ensaio de estanqueidade após 72 horas. A – Laje com emulsão asfáltica; B – Laje com membrana acrílica; C – Laje com resina termoplástica; D – Laje referência.

3.2 Absorção por imersão

A Figura 3 apresenta os resultados coletados para a taxa de absorção por imersão. A taxa média inicial, em 24 horas, dos corpos de prova impermeabilizados foi de 0,3%, contra 5,17% dos corpos de prova referência. Após o período de 72 horas observou-se um pequeno aumento das taxas, sendo a taxa média de absorção dos corpos de prova impermeabilizados de 0,4%, e de 5,23% para a série referência. Considerando a absorção referência de 2,5% citada por Basheer *et al.* (2001), nota-se que somente as amostras impermeabilizadas podem ser consideradas como substratos estanques.

Analisando comparativamente os resultados obtidos para as séries impermeabilizadas notou-se um comportamento muito semelhante entre elas, e satisfatório se comparado à série referência. Pelo desvio padrão obtido as séries emulsão asfáltica e resina termoplástica puderam ser consideradas estatisticamente equivalentes, pelo teste de Tukey, em todas as leituras realizadas. Na idade final avaliada, 72 horas de ensaio, a membrana acrílica foi a que apresentou o menor valor, validado estatisticamente, entre todas as séries avaliadas, indicando seu melhor desempenho durante este ensaio.

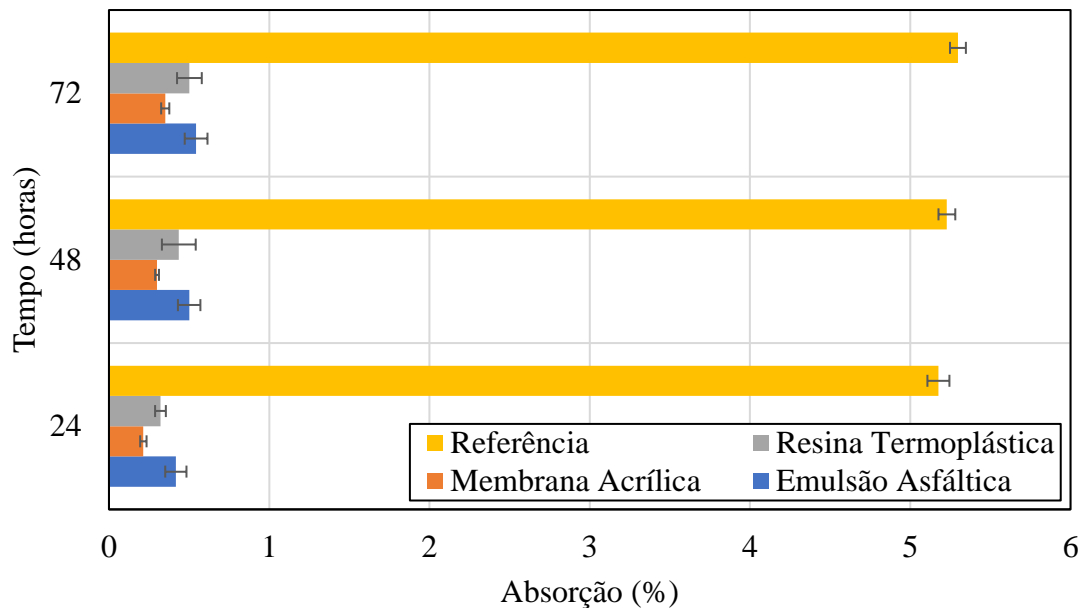


Figura 3. Resultado do ensaio de absorção por imersão.

3.3 Absorção por capilaridade

Nos períodos iniciais do ensaio, 3 e 6 horas, o comportamento dos corpos de prova com os produtos impermeabilizantes pode-se considerar similar, pois a média de taxa de absorção nesses períodos foi entre 0,659%, sendo todos considerados estatisticamente equivalentes pelo teste estatístico aplicado. Porém, no último intervalo de leitura do ensaio, 72 horas, os corpos de prova da série resina termoplástica apresentaram a menor taxa de absorção de 1,05%, contra uma média de 2,34% dos demais produtos. Ao final do ensaio a série referência teve uma absorção 7,9 vezes maior do que a série de resina termoplástica, que teve o melhor comportamento. A emulsão asfáltica e membrana acrílica se mantiveram com equivalente estatisticamente, considerando a maior variabilidade de desvio padrão entre eles, conforme Figura 4.

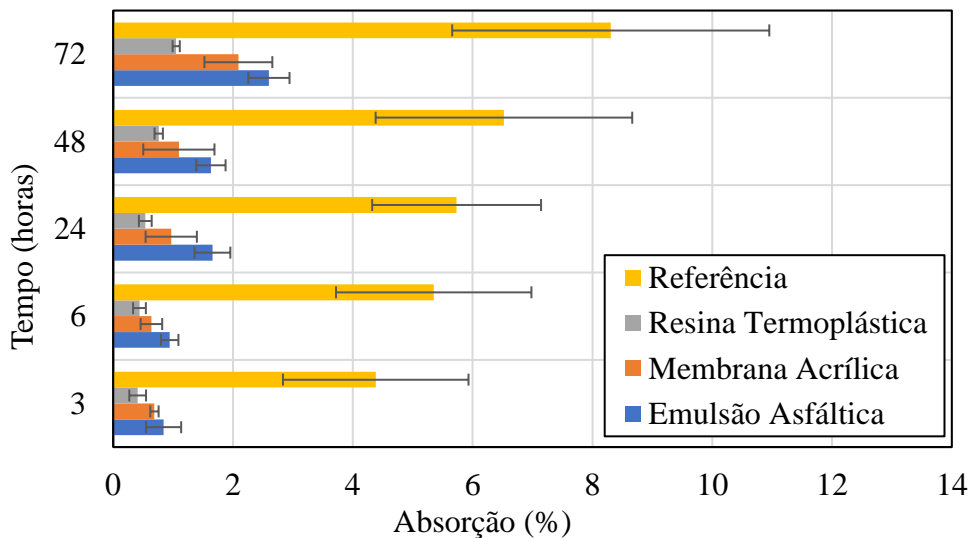


Figura 4. Resultado do ensaio de absorção por capilaridade.

O melhor desempenho da resina termoplástica no ensaio de absorção capilar confirma a indicação de Pezzolo (2013), que propões o uso do material para impermeabilização em rodapés de paredes de drywall.

A análise visual dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão diametral e, posteriormente, a análise por termografia infravermelha, permitiu a confirmação do desempenho inferior da série referência e do desempenho semelhante entre as séries impermeabilizadas. A Figura 5 apresenta os corpos de prova da série referência que foram submetidos ao ensaio de compressão diametral. Para o caso dessa série notou-se uma altura média de ascensão capilar de 4,3cm.

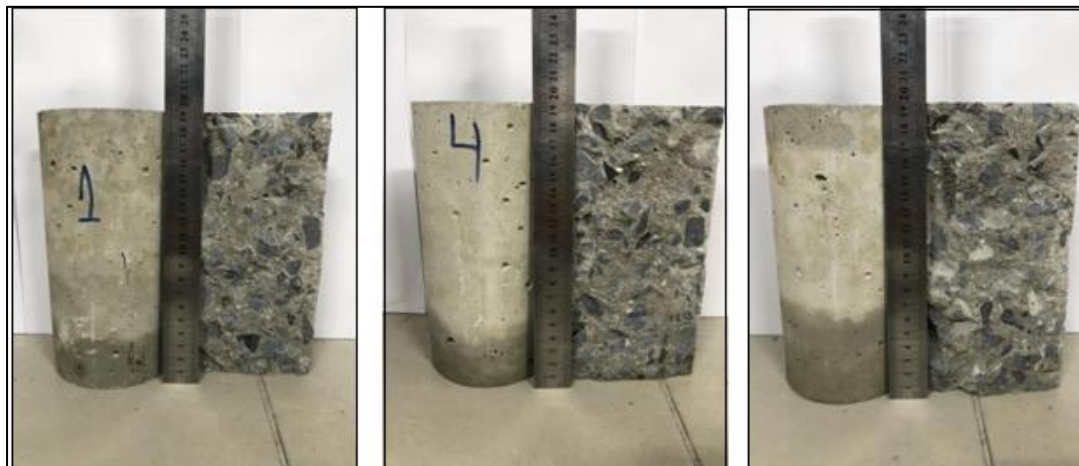


Figura 5. Corpos de prova da série referência após o ensaio de compressão diametral.

As imagens termográficas para a série referência, Figura 6, confirmam a percolação da água para o interior do corpo de prova, visto que a temperatura obtida no ensaio foi a menor entre as séries estudadas (23,1 °C).

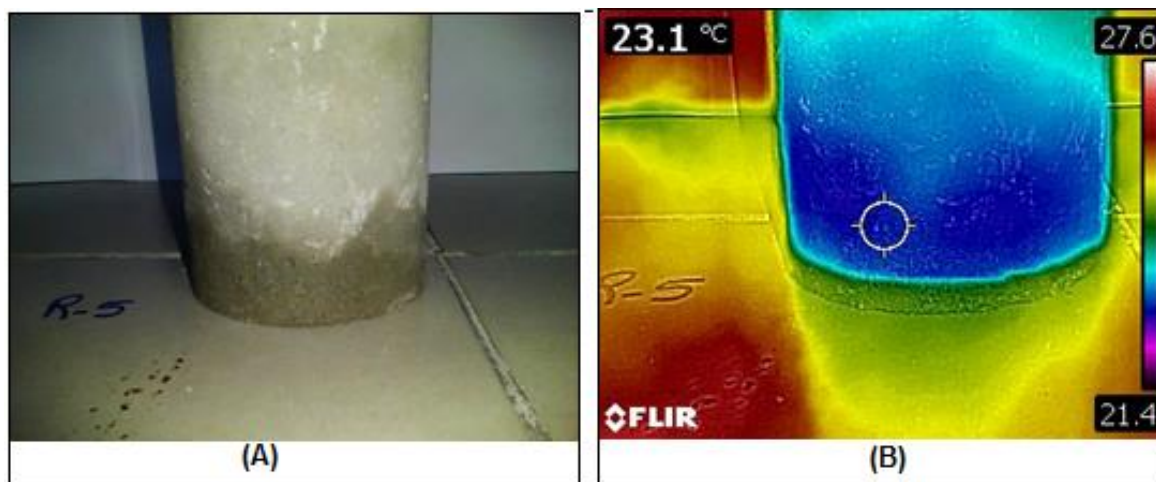


Figura 6. Imagem termográfica infravermelha para a série referência. A - Corpo de Prova após o ensaio de compressão diametral; B - Corpo de prova durante o ensaio de termografia.

A Figura 7 apresenta os corpos de prova das séries impermeabilizadas após o ensaio de compressão diametral. Para essas séries a dificuldade de obtenção das leituras de ascensão capilar foi maior, sendo a análise realizada por meio das imagens termográficas, apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10. Percebe-se que as temperaturas registradas nas imagens termográficas são próximas ao mínimo indicado na escala referência, ao lado direito de cada imagem, indicando então a região de absorção de água.

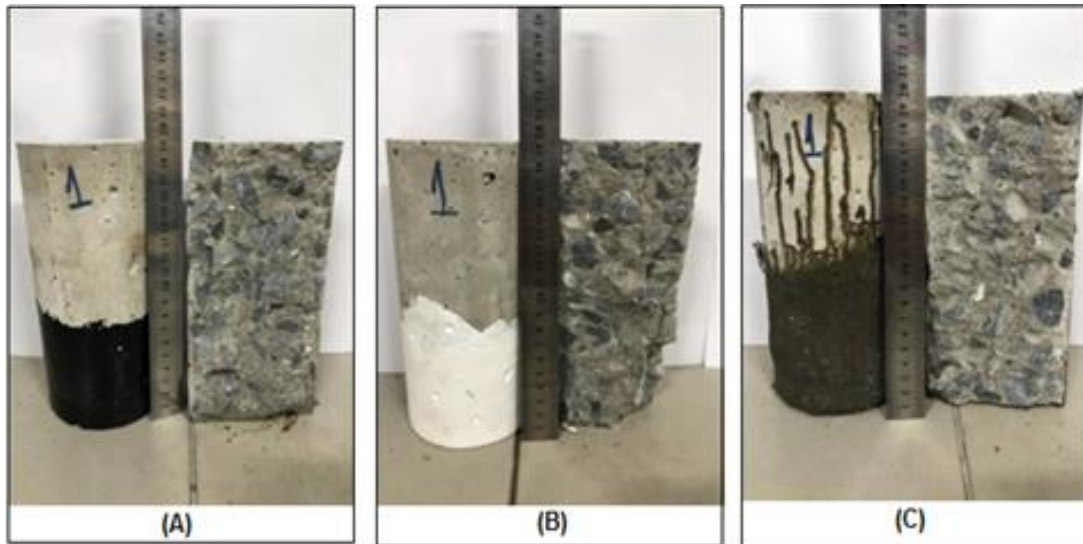


Figura 7. Corpos de prova das séries impermeabilizadas após o ensaio de compressão diametral. A – Amostra com emulsão asfáltica; B – Amostra com membrana acrílica; C – Amostra com resina termoplástica.

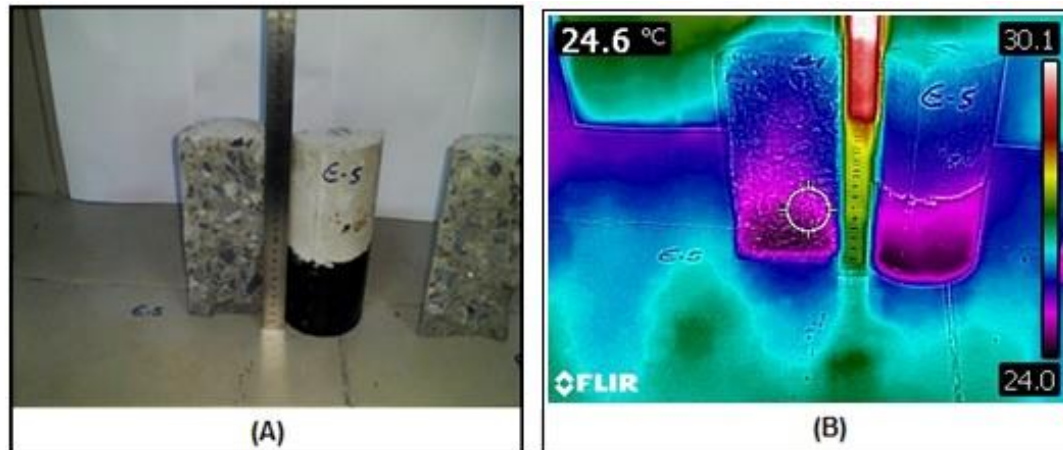


Figura 8. Imagem termográfica infravermelha para a série com emulsão asfáltica. A - Corpo de Prova após o ensaio de compressão diametral; B - Corpo de prova durante o ensaio de termografia.

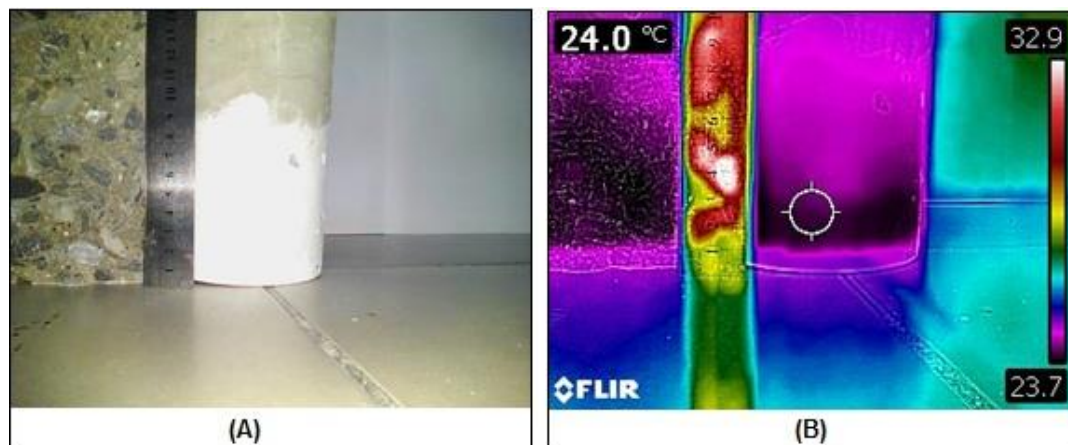


Figura 9. Imagem termográfica infravermelha para a série com membrana acrílica. A - Corpo de Prova após o ensaio de compressão diametral; B - Corpo de prova durante o ensaio de termografia.

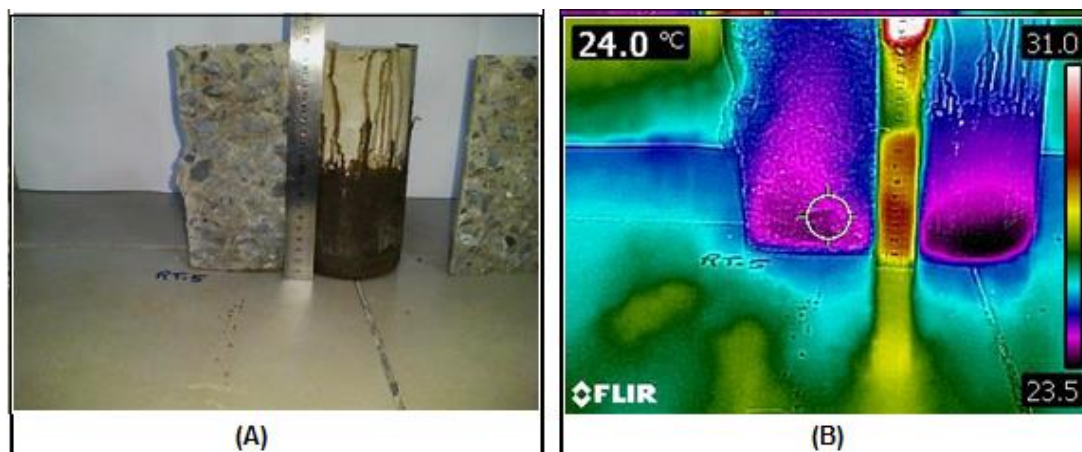


Figura 10. Imagem termográfica infravermelha para a série com resina termoplástica. A - Corpo de Prova após o ensaio de compressão diametral; B - Corpo de prova durante o ensaio de termografia.

O ensaio de termografia indicou, entre as séries impermeabilizadas, o melhor desempenho para a série de emulsão asfáltica, que apresentou a maior temperatura, 24,6 °C. As séries de membrana acrílica e resina termoplástica apresentaram a mesma temperatura, indicando comportamento semelhante, de 24 °C.

Ainda, segundo o exposto na literatura, a variação de 1 °C a 2 °C, é considerada indício de problemas (Cortizo, 2007; Freitas *et al.*, 2014). Assim sendo, a diferença de temperatura observada entre a série referência e as séries impermeabilizadas já é suficiente para apontar melhor desempenhos dessas últimas.

Mesmo que pequena, a diferença observada na variação de temperatura das imagens termográficas estudadas, mostrou-se adequada para a detecção da absorção, uma vez que a análise visual, nos corpos de prova rompidos, confirmou a ascensão capilar. No mais, a respeito da pequena variação, a literatura ainda reporta que variações na ordem de 1°C já são passíveis de identificação de infiltração em elementos de concreto (Maldague, 2001; Merlinho, Matias e Farias, 2015; Lourenço, Matias e Faria, 2017; Rocha, Santos, Oliveira, Albuquerque e Póvoas, 2018).

3.4 Absorção por imersão após envelhecimento acelerado

O ensaio de absorção após o envelhecimento acelerado, apresentado na Figura 11, apresentou redução de absorção para a série referência ao longo do tempo. O resultado era esperado, uma vez que a contínua hidratação do cimento Portland ocasiona o tamponamento dos poros, diminuindo assim a permeabilidade do material (Rossignolo, 2005). Ainda, uma vez que os corpos de prova foram sujeitos ao tempo, cabe destacar a possível influência do fenômeno de carbonatação, que pode ter colaborado para o preenchimento dos poros, por carbonato de cálcio (CaCO₃), e redução da capacidade absorvente do material, como reportado por Ngala e Page (1997). Os resultados de absorção da série referência foram da ordem de 5% na idade inicial para 3% na idade final estudada, confirmando o preenchimento dos poros.

Todas as séries impermeabilizadas apresentaram aos 84 dias absorção inferior a apresentada aos 28 dias, também explicado pela secagem e fixação dos produtos no período. Contudo, a partir dos 140 dias foi possível notar uma inversão comportamental, ou seja, as séries passaram a apresentar absorções maiores se comparada a idade de 28 dias.

Cabe destacar que os três impermeabilizantes aplicados, podiam, segundo seus fabricantes, serem aplicados em locais abertos, como lajes cobertura. Sendo assim, por mais que fossem submetidos a ciclos de molhagem e secagem o desempenho não deveria ter sido impactado. Segundo Silveira e Granato (2013), o sistema impermeabilizante deve ser capaz de suportar todos os tipos de solicitações durante a vida útil, quer sejam de natureza mecânica ou química. Assim sendo, a

escolha do sistema deve sempre levar em consideração as solicitações atuantes, de modo que o material aplicado atenda a demanda proposta.

Os valores obtidos nesse ensaio ainda confirmam o melhor desempenho das séries impermeabilizadas, sendo a média de absorção entre elas, aos 196 dias de 0,52%, contra 3,0% da série referência. Contudo, destaca-se a necessidade de observação de desempenho destes materiais ao longo do tempo, visto que a ineficiência dos mesmos levaria a um prejuízo direto na vida útil das estruturas de concreto. Sendo a proposta do trabalho a avaliação de aplicação dos sistemas em lajes cobertura, espera-se que os sistemas resistam a ação dos raios UV, bem como a solicitação higroscópica de molhagem e secagem constante.

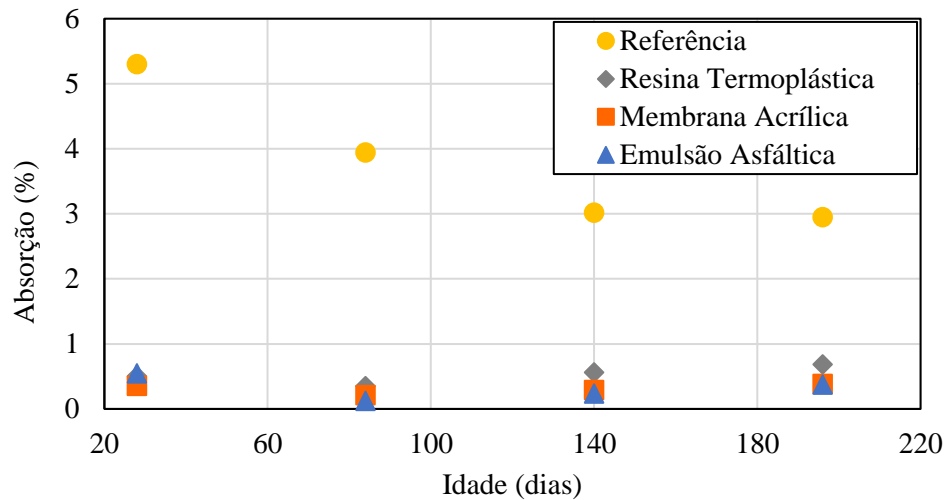


Figura 11. Resultado do ensaio de absorção por imersão após envelhecimento acelerado.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitiram apontar as conclusões listadas a seguir:

- O teste de estanqueidade indicou comportamento semelhante entre todas as séries estudadas, não podendo ser observado, no período indicado pela NBR 15575 (ABNT, 2013), infiltração, percolação ou qualquer outro indício de falha nas três séries observadas;
- O ensaio de absorção por imersão mais uma vez indicou comportamentos semelhantes entre os produtos estudados, contudo, neste caso, foi possível apontar, ao final do ensaio, o melhor desempenho da membrana acrílica, sendo a absorção do material igual a 0,35%;
- O ensaio de absorção por ascensão capilar indicou melhor desempenho para a resina termoplástica, confirmando sua indicação para o uso em rodapés;
- As imagens termográficas auxiliaram na visualização da percolação da água para o interior dos corpos de prova, confirmando o melhor desempenho (temperaturas superiores) para as séries impermeabilizadas;
- Por fim, o envelhecimento acelerado foi sensível para indicar uma mudança comportamental entre as séries impermeabilizadas, contudo, ao final do ensaio o desempenho dessas ainda é muito superior (cerca de 6 vezes) à série referência. Recomenda-se o acompanhamento destes materiais por um período maior de estudo, a fim de verificar a eficiência dos mesmos e confirmar a vida útil desses em serviço.

5. AGRADECIMENTOS





Os autores agradecem as agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pelo apoio financeiro, a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), ao Centro Universitário UNIFACEAR e a concreteira NOVAMIX por todo o auxílio dado ao estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Aldea, C., Shah, S. P., Karr, A. (1999) “Permeability of cracked concrete” *Materials and Structures*, 32, pp. 370–376. <https://doi.org/10.1007/BF02479629>
- Andrello, J. M., Takagi, E. (2017) “*Debate técnico: impermeabilização in loco*” Construção Mercado - Técnica, PINI.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2005). *NBR 9685: Emulsão Asfáltica para Impermeabilização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2005). *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2008). *NBR 13321: Membrana acrílica para impermeabilização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2010). *NBR 15885: Membrana de Polímero Acrílico com ou sem Cimento para Impermeabilização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho*. Rio de Janeiro.
- Basheer, I., Kropp, J., Cleland, D. J. (2001) “Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review” *Construction and Building Materials*, 15 (2-3), pp. 93– 103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- Bauer, E., Vasconcelos, P. H. C., Granato, J. E. (2010) “Sistemas de impermeabilização e isolamento térmico” In: ISAIA, G. C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Ed. IBRACON.
- Cortizo, E. C. (2007) “Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: Ênfase em edificações de Patrimônio Histórico” 178f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte.
- Freitas, J. G., Carasek, H., Cascudo, O. (2014) “Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 57-73. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000100006>
- Gao, J., Yu, Z., Song, L., Wang, T., Wei, S. (2013) “Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles” *Construction and Building Materials*. v. 39, pp. 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.033>
- Gong, J., Cao, J., Wang, Y. (2016) “Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete” *Construction and Building Materials*. v.125, pp.12-20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.023>
- Jiang, L., Niu, D. (2016) “Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles” *Construction and Building Materials*. v. 117, pp. 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.094>

- Lourenço, T., Matias, L., Faria, P. (2017) “*Anomalies Detection in Adhesive Wall Tiling Systems by Infrared Thermography.*” *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.052>
- Maldague, X. (2001) “*Infrared and Thermal Testing: nondestructive testing handbook.*” 3. ed. Columbus, OH: Patrick O. Moore.
- Melrinho, A., Matias, L., Faria, P. (2015). *Detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço através da termografia de infravermelhos.* *Tech ITT by Construlink*, 13(37), 29-38. https://run.unl.pt/bitstream/10362/16576/1/RI%20-%20Melrinho%20et%20al_RIT%2037_2015.pdf
- Menezes, M. (2018) “*Influência da umidade do substrato na aderência de sistema de impermeabilização com manta asfáltica aderida à maçarico*” IBI - Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 16 p, São Paulo.
- Morgado, J. M., et al. (2018) “*Guia de aplicação da norma de desempenho para impermeabilização. Especificação, aplicação e contratação com foco no atendimento à ABNT 15575/2013*” IBI – Instituto Brasileiro de Impermeabilização, Rio de Janeiro.
- Ngala, V. T., Page, C. L. (1997) “*Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes*”. *Cement and Concrete Research*, V. 27, n.7, pp. 995-1007. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00102-6)
- Pezzolo, V. (2013) “*Conheça os tipos de impermeabilizante*” Equipe Obra Prima, PINI.
- Picchi, F. A. (1986) “*Impermeabilização de coberturas*” Editora Pini, São Paulo.
- Rocha, J. H. A., Santos, C. F. dos, Oliveira, J. B. de, Albuquerque, L. K dos S., Póvoas, Y. V. (2018) “*Detecção de infiltração em áreas inerenas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso*” *Ambiente Construído*, Porto Alegre, V. 18, n.4, pp. 329-340. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400308>
- Rossignolo, J. A. (2005) “*Avaliação da porosidade e do teor de CH de pastas de cimento Portland com Sílica Ativa e Látex SRB*” *Revista Matéria*, V.10, n.3, pp. 437-442. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10654>
- Silveira, M. A., Granato, J. E. (2013) “*Diretrizes de desempenho para produtos de impermeabilização*”. 13º Simpósio Brasileiro de Impermeabilização.

Extensão da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos através da aplicação de técnicas eletroquímicas

P. Garcés^{1*} , M. A. Climent , J. Carmona , M. J. Sánchez de Rojas 

* Autor de Contato: pedro.garces@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.518>

Recepção: 21/10/2020 | Aceitação: 03/12/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a viabilidade de um tratamento combinado de extração eletroquímica de cloreto (EEC) e proteção catódica (PC) em estruturas de concreto armado usando uma pasta condutora de cimento-grafite como ânodo. Verificou-se que a aplicação prévia de um tratamento de extração eletroquímica de cloretos, acarreta uma maior durabilidade do ânodo. Foi demonstrado que, para estruturas de concreto armado localizadas em ambientes marinhos agressivos, a combinação de tratamentos eletroquímicos, primeiro EEC para reduzir o teor de cloreto e depois PC para manter as condições de passivação, é capaz de fornecer condições de proteção adequadas às armaduras, desde que seja aplicado o valor de densidade de corrente adequado, de acordo com o teor médio de cloretos presente nas estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: concreto armado, extração eletroquímica de cloreto, proteção catódica.

Citar como: Garcés, P. Climent, M. A., Carmona, J., Sánchez de Rojas, M. J. (2021), “Extensão da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos através da aplicação de técnicas eletroquímicas”, Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 48 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.518>

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

Contribuição de cada autor

Neste trabalho os autores P.G. e M.A.C. contribuiu com a ideia original da pesquisa, a direção conjunta do projeto, a direção conjunta das teses de doutorado de J.C. e M.J.S.d.R., discussão dos resultados e redação do trabalho. Os autores J.C. e M.J.S.d.R. contribuiu com a experimentação, coleta de dados e participação na discussão dos resultados

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Extension of the useful life of reinforced concrete structures exposed to marine environments through the application of electrochemical techniques

ABSTRACT

In this work, the feasibility of a combined treatment of electrochemical chloride extraction (ECE) and cathodic protection (CP) in reinforced concrete structures using a conductive cement-graphite paste as anode has been studied. It has been proven that the prior application of an electrochemical chloride extraction treatment leads to greater durability of the anode. It has been shown that for reinforced concrete structures located in aggressive marine environments, the combination of electrochemical treatments, first ECE to reduce the chloride content and then CP to maintain passivation conditions, is capable of providing adequate protection conditions for the reinforcement, provided that the appropriate current density value is applied, according to the average content of chlorides present in the reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete, electrochemical chloride extraction, cathodic protection.

Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado la viabilidad de un tratamiento combinado de extracción electroquímica de cloruros (EEC) y protección catódica (PC) en estructuras de hormigón armado utilizando como ánodo una pasta conductora de cemento-grafito. Se ha comprobado que la aplicación previa de un tratamiento de extracción electroquímica de cloruros conlleva una mayor durabilidad del ánodo. Se ha demostrado que, para estructuras de hormigón armado situadas en ambientes marinos agresivos, la combinación de tratamientos electroquímicos, primero EEC para reducir el contenido de cloruros y a continuación PC para mantener las condiciones de pasivación, es capaz de proveer condiciones adecuadas de protección a la armadura, siempre que se aplique el valor de densidad de corriente adecuado, de acuerdo con el contenido medio de cloruros presente en las estructuras de hormigón armado.

Palabras clave: hormigón armado, extracción electroquímica de cloruros, protección catódica.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas que podem afetar o concreto armado é a corrosão da armadura. Para reabilitar uma estrutura de concreto armado (ECA) que sofreu corrosão de armadura, é necessário reparar os danos causados. Os reparos tradicionais, tipo localizado, consistem basicamente na remoção de concreto danificado possivelmente contaminado por cloretos, limpeza adequada da armadura e às vezes substituição, e posterior substituição do concreto removido.

Algumas técnicas eletroquímicas têm sido usadas com sucesso para a proteção e correção da corrosão da armadura nas ECA. Todas essas técnicas baseiam-se na diminuição do potencial elétrico do aço (Page, 1992; Mietz, 1998; Andrade, et al, 1998; Tritthart, 1998; Pedferri e Bertolini, 2000; Bertolini, 2004; Polder, 2005). Esse efeito pode ser obtido por conexão a um metal menos nobre, como na técnica por proteção catódica (PC) por ânodo de sacrifício, ou por conexão ao polo negativo de uma fonte de alimentação, como na aplicação do PC por corrente impressa (Page, 1997; Pedferri, 1996; Polder, 1998; Bertolini, et al, 1998; Glass e Chadwick, 1994).

O principal objetivo do PC é parar a corrosão do aço da armadura, quando esta já começou. Existe uma variante do PC chamada prevenção catódica (PreC), segundo Pedferri et al. (Pedferri, 1996; Polder, 1998; Bertolini, et al, 1998; Glass e Chadwick, 1994). O objetivo do PreC é evitar o aparecimento de corrosão de aço em novas estruturas. Por outro lado, existem técnicas eletroquímicas destinadas a alterar as condições predominantes de corrosão das estruturas, diminuindo o teor de cloreto, como a técnica de extração eletroquímica do cloreto (EEC). Isso não requer a substituição do concreto contaminado e, uma vez extraída uma quantidade suficiente de cloretos, a vida útil da estrutura é aumentada (Slater, et al, 1976; Vennesland, et al, 1986; Hansson e Hansson, 1993; Elsener, et al, 1993).

Um aspecto importante em relação à aplicação desta técnica é o efeito do arranjo de vergalhões sobre a eficiência da EEC. Sánchez de Rojas et al, concluem que a eficiência na extração depende do arranjo das armaduras. Mas sempre pode-se extrair cloretos entre duas camadas de armadura de aço (Garcés, et al, 2006; Sánchez de Rojas, et al, 2006). Por outro lado, diferentes soluções para ânodo externo foram testadas, como o uso de uma malha rígida de Ti-RuO₂ e um feltro de grafite, ambos envoltos com polipropileno em um sistema do tipo sanduíche. Concluiu-se que se for tomado cuidado suficiente para evitar o contato defeituoso entre a camada de feltro ou a malha Ti-RuO₂ e a superfície do elemento de construção, a eficiência obtida deve ser semelhante (Climent, et al, 2006).

Por fim, também em relação ao ânodo externo, o avanço mais importante dos últimos anos tem focado no estudo da viabilidade do uso de uma pasta de cimento condutor (PCC), baseada em misturas de cimento com diferentes materiais carbonosos, como revestimento anódico da superfície do concreto para aplicações eletroquímicas na ECA (Perez, et al, 2010; Carmona, et al, 2015a; Cannon, et al, 2013; Del Moral, et al, 2013; Carmona, et al, 2015b; Climent, et al, 2016; Carmona, et al, 2017; Climent, et al, 2019). É comprovado que a eficiência desses ânodos, em relação à extração de Cl⁻, foram semelhantes às obtidas com um ânodo tradicionalmente utilizado na EEC, como a malha de Ti-RuO₂ (Pérez, et al, 2010). A pasta de cimento condutor é mais versátil como um ânodo, pois permite maior facilidade de aplicação em diferentes tipos de superfície e também oferece a possibilidade de reutilização.

Uma das possibilidades mais atrativas oferecidas por essas camadas condutoras anódicas é a possibilidade de aplicação combinada sucessiva de EEC e PC, sem alterar o ânodo (Carmona, et al, 2015a; Climent, et al, 2019). Essa combinação de tratamentos pode ser desejável no caso de estruturas altamente contaminadas com íons Cl⁻, e cujo nível de contaminação ambiental por cloretos deverá permanecer alto no futuro, por exemplo, no caso da ECA exposta a ambientes marinhos severos. Nesses casos, pode-se considerar necessário primeiro reduzir o teor de Cl⁻ por aplicação da EEC, e depois manter o aço protegido por um tratamento permanente de PC, sem a

necessidade de aplicar uma densidade de corrente muito alta durante a aplicação do PC, e, portanto, reduzir o risco de mal funcionamento do ânodo devido à acidificação produzida na superfície. As condições operacionais das técnicas eletroquímicas mencionadas acima diferem em cada caso (Carmona, et al, 2015a; Cannon, et al, 2013; Del Moral, et al, 2013; Carmona, et al, 2015b; Climent, et al, 2016; Carmona, et al, 2017; Climent, et al, 2019). A densidade de corrente típica nas aplicações técnicas EEC está na faixa de 1-5 A/m², enquanto a densidade de carga elétrica passada é tipicamente entre 1x10⁶ e 5x10⁶ C/m². Do ponto de vista eletroquímico, a densidade atual deve ser definida referindo-se à superfície do eletrodo, ou seja, a superfície do cátodo, o aço da armadura. No entanto, no campo das aplicações de engenharia às vezes é difícil saber exatamente a área de reforço do aço. Conseqüentemente, a densidade atual é frequentemente referida à superfície de concreto exposta, que, no caso de sistemas de camadas anódicas, corresponde à área do ânodo. Além disso, a técnica de proteção catódica do PC normalmente aplica valores de densidade atual entre 5 e 20 mA/m², enquanto o PreC precisa de apenas 1-3 mA/m². No entanto, no caso do PC, a densidade atual necessária para alcançar uma proteção de aço eficaz é ainda maior quanto maior o teor de Cl⁻ no concreto. Abaixo está o programa experimental e os principais resultados obtidos na aplicação combinada e sucessiva de CEE e PC, sem alterar o ânodo, consistindo em uma pasta de cimento condutora. Essa combinação de tratamentos pode ser desejável no caso de estruturas altamente contaminadas com íons Cl⁻, e cujo nível de contaminação ambiental por cloretos deverá permanecer alto no futuro, por exemplo, no caso da EHA exposta a ambientes marinhos severos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Metodologia

Os corpos de prova (amostras) destinadas aos ensaios de PC ou EEC+PC foram preparadas com concreto para o qual os íons Cl⁻ foram adicionados na água de amassamento. A Tabela 1 mostra a nomenclatura dos corpos de prova (CPs) para a aplicação de técnicas eletroquímicas. Todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo regime de contaminação de Cl⁻ durante as 24 semanas dos tratamentos de PC: 65 ml de spray semanal de uma solução de NaCl 0,5 M na superfície do concreto ou na superfície da camada anódica, a fim de simular contaminação contínua de cloreto devido, por exemplo, à exposição da ECA a um ambiente marinho muito agressivo como mencionado anteriormente.

Tabela 1. Nomenclatura das amostras para a aplicação de técnicas eletroquímicas

Corpo de prova	Nº. Corpo de prova	Quantidade inicial de Cl ⁻ (% referida à massa de cimento)	Tratamento eletroquímico aplicado
P	1	0%	-
R	1	2%	-
ER	1	2%	EEC
A	1	2%	PC
EA	1	2%	EEC + PC

2.2. Corpos de prova de concreto armado

Os corpos de provas foram elementos prismáticos de concreto armado, com dimensões de 18x18x8 cm³, que foram armados com uma grade de 16x16 cm² composta por 6 barras de aço (5 mm de diâmetro) soldadas simetricamente formando quadrados de 5 cm de diâmetro.

Esta grade foi localizada a 2 cm da face superior onde está localizado o ânodo de cimento-grafite. O sistema utilizado para conectar a armadura (cátodo) ao polo negativo da fonte de alimentação foi através de conectores de cobre isolados plásticos, parafusados à armadura, ver figura 1.

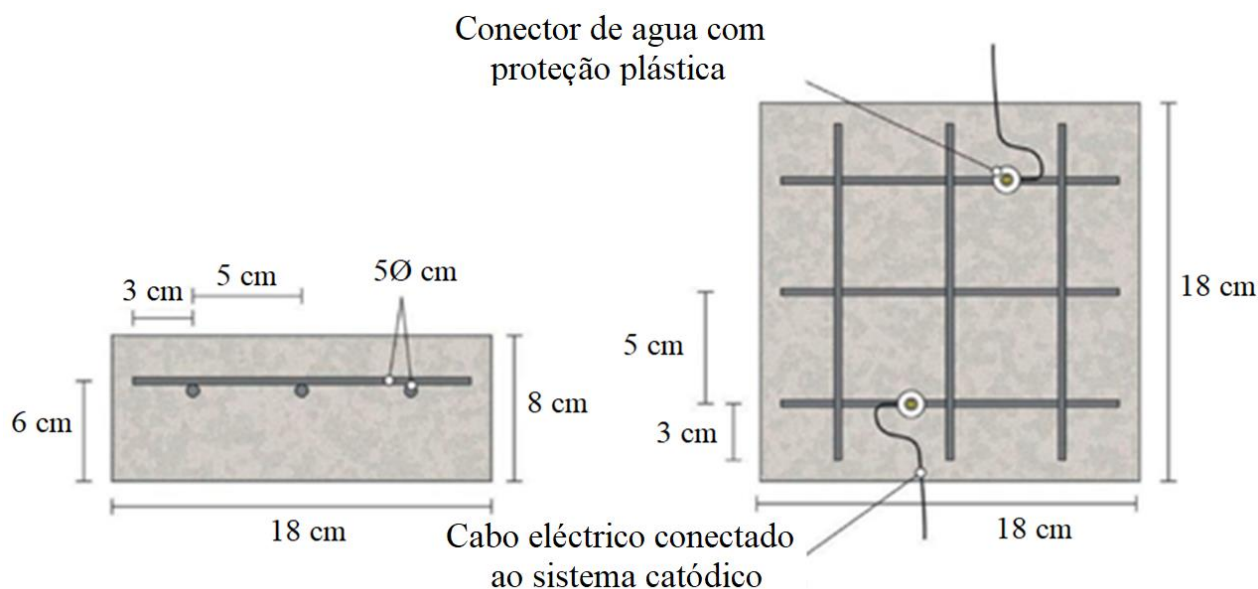


Figura 1. Esquema de armadura dos corpos de prova e da conexão do sistema catódico (armadura de aço). Adaptado de (Carmona, et al, 2015a).

A dosagem de concreto foi a apresentada na Tabela 2. Uma mistura foi preparada com 2% de Cl^- (adicionado à água de amassamento de NaCl) relacionada à massa de cimento para CPs usados em aplicações de PC ou nos tratamentos combinados de (EEC+PC), ver Tabela 2. Uma vez removidos os moldes, as amostras foram curadas em um ambiente com UR de 95-98% durante 28 dias. As características resistentes do concreto endurecido foram as seguintes: Resistência à compressão 37,8 N/mm² (AENOR, 2009), porosidade 11,1% (UNE, 2014) e densidade 2,38 T/m³ (UNE EN, 2009).

Tabela 2. Dosagem do concreto para a preparação dos CPs de ensaio

Material	Dosagem
Cimento Portland CEM I 42,5 R	250 kg/m ³
Relação água/cimento	0,65
Calcário granular (tamanho máximo 12 mm)	1890 kg/m ³
Superplastificante	2,50 kg/m ³
NaCl	3,3% (2% Cl^- referido à massa de cimento)

2.3 Detalhes experimentais dos ensaios eletroquímicos

Todos os ensaios eletroquímicos foram desenvolvidos utilizando-se como ânodo uma pasta de cimento condutora, obtida ao dosar uma pasta de cimento-grafite misturando ambos os componentes a 50%-50% em massa. A relação água/sólido da pasta foi de 0,8. A resistividade da pasta de cimento-grafite foi medida pelo método de 4 pontas, produzindo um valor de 1,5 Ω m (Galao, et al, 2014). Em seguida, foram feitas duas ranhuras ao longo do revestimento anódico, sem atingir a superfície do concreto, para receber em cada uma delas uma barra de grafite de 2 mm de diâmetro para conectá-las ao polo positivo da fonte elétrica. Estas barras foram revestidas com pasta de cimento-grafite para evitar qualquer contato entre elas e o concreto.

A medição do potencial de corrosão (E_{corr}) e de todos os potenciais de eletrodos foi realizada utilizando-se eletrodos de referência Ag/AgCl. Estes eletrodos foram alojados em orifícios perfurados na superfície exposta da amostra de concreto (que suporta o ânodo de cimento-grafite) até próximo ao vergalhão. Para isso, os orifícios foram perfurados com um tubo plástico e preenchidos com uma solução aquosa de KOH 0,2 M, a fim de simular as condições físico-químicas da solução intersticiais do concreto.

Dois dos CPs foram utilizados para determinar a eficiência do processo de EEC. Testemunhos foram extraídos, e seus perfis de teor de cloreto foram determinados, em um caso antes e em outro após a aplicação da EEC. As eficiências obtidas na aplicação da EEC foram calculadas como percentuais de redução do teor inicial de cloreto. A obtenção do perfil de teor de cloreto antes e depois dos ensaios da EEC permite calcular a eficiência local e total. Os perfis Cl^- foram obtidos essencialmente seguindo os procedimentos recomendados pela RILEM (Vennesland, et al, 2013). Foram removidos testemunhos cilíndricos de 95 mm de diâmetro e 20 mm de altura (até a profundidade da malha da armadura).

Amostras de poeira foram obtidas desses testemunhos em diferentes profundidades (a cada 2 mm) da superfície. Desta forma, 10 amostras de pó de concreto foram obtidas de cada testemunho, permitindo descrever em detalhes o perfil de teor de Cl^- . As análises químicas do teor de cloreto foram realizadas por avaliação potenciométrica (Climent, et al, 1999; Climent, et al, 2004). Todos os valores de teor de cloreto foram expressos neste trabalho como % de Cl^- em relação à massa de cimento.

A técnica EEC foi aplicada galvanicamente com uma densidade atual de 2 A/m² e uma pequena densidade de carga, apenas 1,5 MC/m² em relação à superfície de concreto (2,6 MC/m² em relação à superfície de aço). O eletrólito externo em contato com o ânodo era água potável.

A técnica de PC foi aplicada galvanostaticamente com densidades atuais de 15 mA/m² (em relação à superfície do concreto que é a mesma do ânodo) em dois CPs, um deles previamente tratado com EEC e outro sem tratamento prévio. O valor de densidade atual em relação à superfície das barras de aço foi de 25,5 mA/m² para tratamento de PC. As técnicas de EEC e PC foram aplicadas em condições laboratoriais (20°C e UR 60%). Os dados de potenciais foram registrados usando um sistema de aquisição de dados. A aplicação para PC consistia em 2 fases:

- Fase 1: primeiras 24 semanas. O tratamento de PC mencionado anteriormente foi aplicado continuamente durante as primeiras 13 semanas. Em seguida, a corrente elétrica foi interrompida por 4 semanas e, em seguida, os tratamentos foram retomados até o final. A contaminação por cloreto (pulverização semanal de 65 ml de solução de NaCl 0,5 M na superfície do concreto) foi aplicada continuamente, mesmo durante as semanas em que a corrente foi cortada.

Ao aplicar a técnica de PC, alguns parâmetros eletroquímicos foram medidos. Durante os períodos de passagem de corrente, a tensão de alimentação de cada amostra, ΔE_{feed} , foi obtida como a diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo, e os potenciais individuais anódico e catódico, E_a e E_c respectivamente, foram medidos com base no eletrodo de referência Ag/AgCl. Por fim, para avaliar a eficiência do CP como condições reais de manutenção das condições de proteção do aço, foi utilizado o critério “queda de 100mV”, conforme especificado na ISO 1296:2012 (ISO, 2012). Esse critério tem sido amplamente utilizado para esse fim por diferentes pesquisadores (Glass, et al, 2001; Liu e Shi, 2012; Dugarte, et al, 2015; Christodoulou, et al, 2010). O método consiste em obter a queda de potencial (ΔE_{decay}), que é a diferença entre E_c^{4h} (O valor de E_c 4 horas após o corte de energia), e o potencial catódico 1s após o corte da corrente de E_c^{10} (normalmente denominado "Instant-off"). O valor mínimo dessa queda deve ser de 100 mV para proteção adequada do aço contra corrosão.

Terminado o processo de aplicação das técnicas eletroquímicas, foram extraídos testemunhos de todos os corpos de prova ensaiados e obtidos seus respectivos perfis de teor de cloreto. Isso foi feito para avaliar o efeito líquido dos tratamentos eletroquímicos na quantidade de íons Cl^- capturados pelos corpos de prova de concreto armado durante a exposição contínua a um ambiente muito agressivo.

- Fase 2. Ao final da fase 1 foi observado que todos os corpos de prova perderam as condições de proteção do aço, evidenciadas por valores de ΔE_{decay} inferiores a 100mV. Decidiu-se então iniciar esta segunda fase com o objetivo de recuperar as condições de proteção do aço ajustando a densidade de corrente dos tratamentos de PC. O procedimento consistia em aumentar progressivamente a densidade de corrente por 4 semanas, iniciando no valor de 20 mA/m², até que as condições de proteção fossem novamente alcançadas ($\Delta E_{\text{decay}} \geq 100$ mV).

3. RESULTADOS E APLICAÇÃO

3.1 Aplicação da EEC

Dois corpos de prova de concreto armado foram submetidos à aplicação da técnica EEC antes de iniciar a primeira fase de aplicação dos tratamentos PC. Uma vez finalizado o processo de EEC com os parâmetros estabelecidos, foram obtidos os perfis de teor de Cl^- , correspondentes aos estados antes e depois do tratamento de EEC. Os testemunhos extraídos foram localizados na zona central da superfície do corpo de prova. Devido ao seu desenho e localização do ânodo e cátodo, o campo elétrico aplicado é homogêneo em toda a superfície. As eficiências locais, entendidas como porcentagens de Cl^- extraído, estão representadas na Figura 2.

A média de Cl^- extraído foi de 51% do teor inicial, ou seja, o teor residual de Cl^- no concreto após a EEC foi de aproximadamente 1% com base na massa de cimento. Isso indica um bom comportamento do processo EEC aplicado a um concreto de cimento Portland usando como ânodo uma camada de pasta de cimento condutora pela adição de PCC de grafite, para uma densidade de carga aplicada relativamente baixa, $1,5 \times 10^6$ C/m² em relação à superfície de concreto. Este resultado pode ser comparado com a eficiência de 41% obtida para um elemento de concreto armado muito semelhante, com o mesmo teor inicial de Cl^- , submetido a um tratamento EEC, utilizando uma malha de Ti-RuO₂ como ânodo, e passando por uma densidade de carga total de 1×10^6 C/m² (Pérez, et al, 2010).

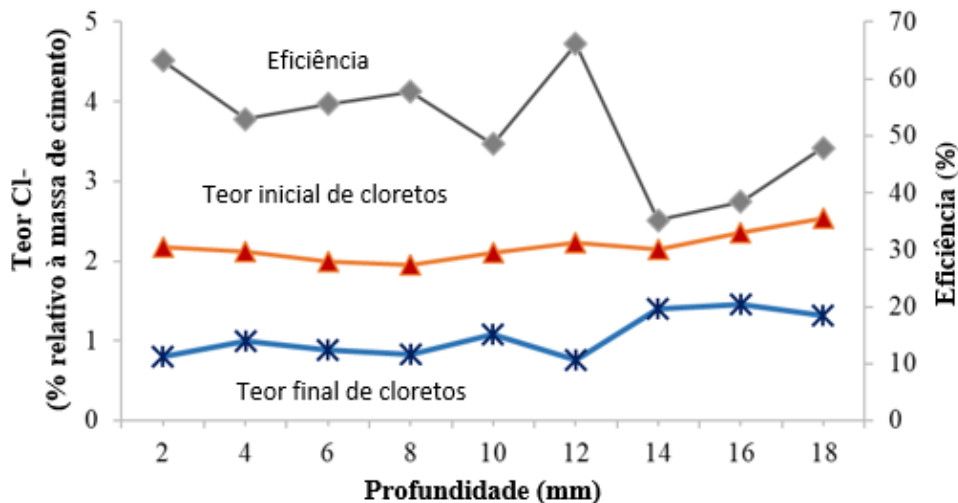


Figura 2. Perfis de teor Cl^- (eixo Y1), correspondendo aos estados antes e depois do tratamento EEC. Em Y2, as eficiências locais são representadas. Adaptado de (Carmona, et al., 2015a).

3.2 Primeira fase dos tratamentos eletroquímicos.

Esta seção descreve os resultados dos ensaios realizados para investigar o comportamento dos ânodos PCC durante os tratamentos eletroquímicos de proteção em ECA afetados pela corrosão da armadura devido à contaminação grave com Cl^- , sendo estes PC, e o tratamento combinado de EEC + PC.

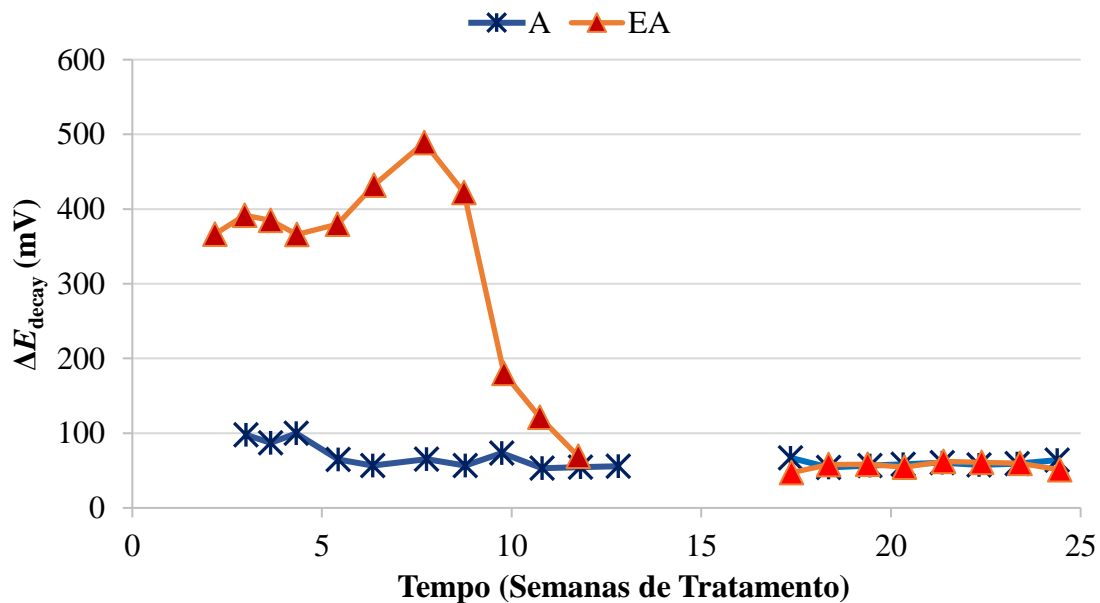


Figura 3. Evolução do ΔE_{decay} durante o tratamento da CP. A: PC; EA: EEC + PC. Todos eles foram submetidos a um processo de contaminação por Cl^- por 24 semanas. Os tratamentos eletroquímicos foram interrompidos da semana 13 a 17 Adaptado de (Carmona, et al., 2015a).

Para verificar a eficácia dos tratamentos de PC e da aplicação combinada de EEC + PC na proteção contra corrosão das armaduras, foi utilizado o critério de "queda de 100 mV" (ISO, 2012), conforme estabelecido na seção 2.4. A Figura 3 mostra a evolução dos valores de ΔE_{decay} para os valores dos corpos de prova referidos na Tabela 1, durante as 24 semanas de experimento. Os valores de ΔE_{decay} do corpo de prova A, tratado apenas com PC, praticamente nunca atingiram o limite de 100 mV.

Parece que a aplicação de uma densidade de corrente de 15 mA/m² não foi suficiente para fornecer proteção ao aço nestas condições muito agressivas: teor de Cl^- inicial de 2% mais contaminação contínua com sal (pulverização semanal da superfície do Camada anódica PCC). Com relação ao corpo de prova EA (EEC + PC), as condições de proteção do aço foram mantidas por 11 semanas devido à corrente aplicada, apesar da contaminação externa com Cl^- . A aplicação de PC com densidade de corrente de 15 mA/m², em relação à superfície do concreto, foi capaz de manter as condições de proteção do aço, desde que o teor inicial de Cl^- do corpo de prova fosse de até 1%.

Portanto, caso o teor inicial de Cl^- da amostra fosse em torno de 2%, uma densidade de corrente maior seria necessária para atingir as condições de proteção (Pedferri, 1996). Essas observações corroboram a hipótese principal da presente investigação, ou seja, em casos de ECA com alta contaminação de Cl^- submetidos por sua vez a um ambiente agressivo de cloretos como em certos ambientes marinhos, seria vantajoso aplicar um tratamento inicial de CEE sucessivamente a reduzir o teor de Cl^- e, em seguida, manter as condições de proteção do aço estendendo um tratamento contínuo do PC, sem a necessidade de usar uma densidade de corrente muito alta, o que pode eventualmente afetar o bom comportamento do sistema anódico (Carmona, et al, 2015a). Esses tratamentos combinados, EEC + PC, seriam mais convenientemente implementados com o uso

como ânodos de revestimentos condutores de PCC, uma vez que o mesmo ânodo pode servir para o tratamento inicial de EEC e para o tratamento subsequente de PC.

Tabela 3. Teor final médio de cloretos (expressados em % de Cl^- relativos à massa de cimento) ao final das 24 semanas de exposição à uma carga severa de Cl^-

CP	Teor inicial de Cl^- (% referido à massa de cimento)	Tratamento eletroquímico prévio às 24 semanas de primeira fase	Tratamento eletroquímico durante as 24 semanas da primeira fase	Teor final médio (*) (% referido à massa de cimento)
P	0%	-	-	4,93%
R	2%	-	-	6,08%
ER	2%	ECE	-	4,26%
A	2%	-	PC	5,39%
EA	2%	ECE	PC	3,41%

(*) O teor final de Cl^- foi calculado como o valor médio dos encontrados no perfil de teor de Cl^- na capa de cobrimento de concreto (20 mm de espessura).

No final da fase 1, todos os corpos de prova de concreto armado atingiram um grau muito alto de contaminação com Cl^- , como pode ser visto na Tabela 3. No entanto, algumas comparações podem ser feitas para os diferentes casos. Por exemplo, que as amostras tratadas com EEC + PC (EA) durante a fase 1, experimentaram menos entrada de Cl^- do que a amostra de referência ER, que após a aplicação de EEC foi mantida sem qualquer tratamento durante a fase 1. Isso representa uma evidência adicional do “efeito de barreira de penetração de cloreto”, mencionado por Pedferri (Pedferri, 1996), como um dos efeitos secundários benéficos, uma vez que a polaridade do campo elétrico induz um efeito repelente de íons negativos, e portanto, reduz os cloretos capturados pelo concreto em um ambiente agressivo de cloretos, como o ambiente marinho.

3.3 Segunda fase de tratamentos eletroquímicos

Dado que após 24 semanas da fase 1, incluindo o período de interrupção da corrente entre as semanas 13 e 17, as armaduras em todos os corpos de prova de concreto perderam completamente suas condições de proteção, sendo demonstrado que o PC de 15 mA/m^2 não foi capaz de restaurar as condições de proteção, Figura 3, então iniciou-se a fase 2. A contaminação externa por Cl^- parou de ser aplicada porque todos os tubos de ensaio atingiram um teor muito alto de Cl^- , consulte a Tabela 3. Sob essas condições, o PC foi aplicado com valores de densidade de corrente mais altos. A dúvida era se seria possível recuperar as condições de proteção do aço aumentando a densidade de corrente para um valor adequado. No início desta segunda fase, a densidade de corrente foi estabelecida em 20 mA/m^2 . Após 4 semanas de aplicação de PC, o valor limite de 100 mV de ΔE_{decay} não foi atingido, ou seja, as condições de proteção não foram obtidas, Figura 4. O objetivo não foi atingido em uma segunda tentativa a 25 mA/m^2 (Os dados não são mostrados na Figura 4). Finalmente, uma terceira etapa de 40 mA/m^2 foi realizada. Neste caso, após 4 semanas, a regra ΔE_{decay} 100 mV foi alcançada para as amostras EA, A e B.

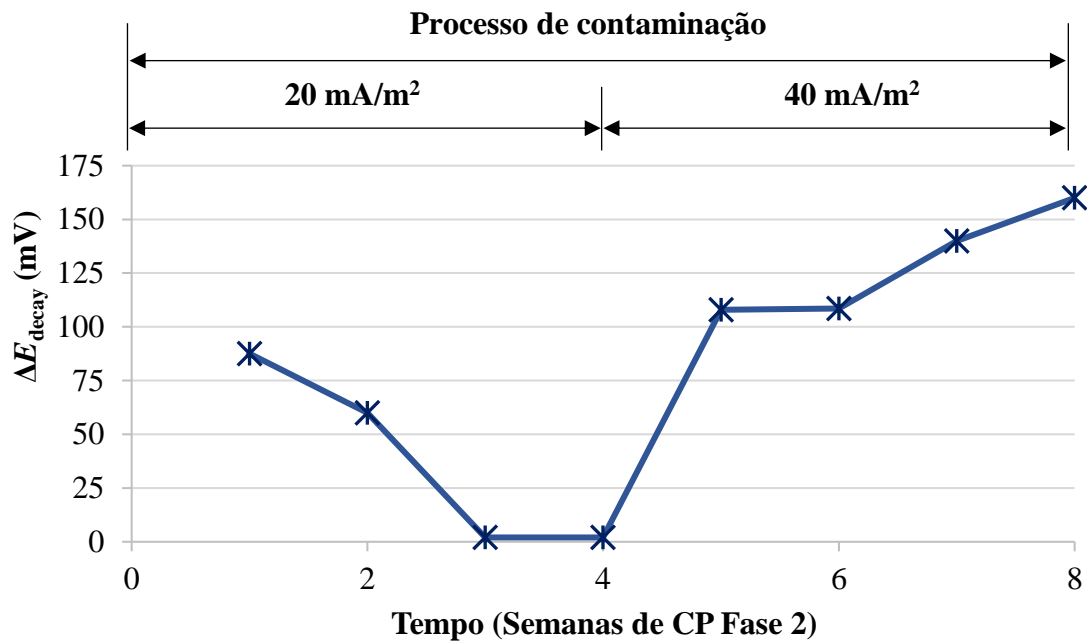


Figura 4. Evolução de ΔE_{decay} para a amostra EA (EEE + PC) durante a fase 2. Primeira etapa de 4 semanas onde foram aplicados 20 mA/cm^2 , e segunda etapa onde foram aplicados 40 mA/cm^2 .

Além disso, as condições de proteção foram verificadas com medidas das diferenças nos valores do potencial de despolarização 7 dias após o corte de energia (ISO, 2012), mais restritivas, onde valores superiores a 150 mV de ΔE_{decay} devem ser alcançados após destes 7 dias; registrando um valor de 209 mV para EA.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho sugerem que é possível utilizar uma pasta condutora de cimento-grafite, recobrando a superfície do elemento de concreto armado, como ânodo na aplicação de sucessivos tratamentos de técnicas eletroquímicas.

Foi demonstrado que, para estruturas de concreto armado localizadas em ambientes marinhos agressivos, a combinação de tratamentos eletroquímicos, primeiro EEC para reduzir o teor de cloretos e depois PC para manter as condições de passivação, é capaz de fornecer condições de proteção adequadas para a blindagem, desde que seja aplicado o valor de densidade de corrente adequado, de acordo com o teor médio de cloretos presente no ECA.

5. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pelo Ministério da Ciência e Inovação (código de subsídio MAT2009-10866) e pela Generalitat Valenciana (código de subsídio PROMETEO / 2013/035). Agradecemos também o financiamento recebido da Agência Estatal de Pesquisa Espanhola (código de concessão BIA2016-80982-R) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (código de concessão BIA2016-80982-R).

6. REFERÊNCIAS

- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C. (1998), *An overview of electrochemical realkalisation and chloride extraction*, in: D.W.S. Ho, I. Godson, F. Collins (Eds.), *Rehabilitation of Structures*, Proceedings of 2nd International RILEM/CSIRO/ACRA Conference, Melbourne, Australia, 21–23, September 1998, RILEM, Melbourne, Australia, pp. 1–12
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2009), *(Ensayos de Hormigón Endurecido. Parte 3: Determinación de la Resistencia a Compresión de Probetas (Testing Hardened Concrete – Part 3: Compressive Strength of Test Specimens)*, Madrid, Spain.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2014), *UNE 83980:2014 Durabilidad del Hormigón. Métodos de Ensayo. Determinación de la Absorción de Agua, la Densidad y la Porosidad Accesible al Agua del Hormigón (Concrete Durability. Test Methods. Determination of the Water Absorption, Density and Accessible Porosity for Water in Concrete)*, Madrid, Spain, (in Spanish).
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2009), *UNE EN 12390-7:2009 Ensayos de Hormigón Endurecido. Parte 7: Densidad del Hormigón Endurecido (Testing Hardened Concrete – Part 7: Density of Hardened Concrete)*, Madrid, Spain.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R. B. (2004), *Electrochemical techniques*, in: *Corrosion of Steel in Concrete*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 345–374.
- Bertolini, L., Bolzoni, F., Pedferri, P., Lazzari, L., Pastore, T. (1998), *Cathodic protection and cathodic prevention in concrete principles and applications*, *Journal of Applied Electrochemistry*. 28, 1321–1331. <https://doi.org/10.1023/A:1003404428827>
- Carmona, J., Garcés, P., Climent, M. A. (2015a), *Efficiency of a conductive cement-based anodic system for the application of cathodic protection, cathodic prevention and electrochemical chloride extraction to control corrosion in reinforced concrete structures*, *Corrosion Science*, 96, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>
- Carmona, J., Climent, M. A., Antón, C., De Vera, G., Garcés, P. (2015b), *Shape effect of electrochemical chloride extraction in structural reinforced concrete elements using a new cement-based anodic system*, *Materials*, 8 (6), 2901–2917. <https://doi.org/10.3390/ma8062901>
- Carmona, J., Climent, M. A., Garcés, P. (2017), *Influence of different ways of chloride contamination on the efficiency of cathodic protection applied on structural reinforced concrete elements*, *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 793, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.08.029>
- Cañón, A., Garcés, P., Climent, M. A., Carmona, J., Zornoza, E. (2013), *Feasibility of electrochemical chloride extraction from structural reinforced concrete using a sprayed conductive graphite powder–cement as anode*, *Corrosion Science*. 77, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.07.035>
- Christodoulou, C., Glass, G. K., Webb, J., Austin, S., Goodier, C. (2010), *Assessing the long term benefits of impressed current cathodic protection*, *Corrosion Science*. 52, 2671–2679. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.018>
- Climent, M. A., Viqueira, E., De Vera, G., López, M. M. (1999), *Analysis of acid-soluble chloride in cement, mortar and concrete by potentiometric titration without filtration steps*, *Cement and Concrete Research*. 29 (6), 893–898. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00063-0)
- Climent, M. A., De Vera, G., Viqueira, E., López, M.M. (2004), *Generalization of the possibility of eliminating the filtration step in the determination of acid-soluble chloride content in cement and concrete by potentiometric titration*, *Cement and Concrete Research*. 34 (12), 2291–2300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.012>

- Climent, M. A., Sánchez de Rojas, M^a. J., De Vera, G., Garcés, P. (2006), *Effect of type of anodic arrangements on the efficiency of electrochemical chloride removal from concrete*. ACI Materials Journal 103, 243-250.
- Climent, M. A., Carmona, J., Garcés, P. (2016), *Graphite–cement paste: a new coating of reinforced concrete structural elements for the application of electrochemical anti-corrosion treatments*, Coatings, 6 (3), 32. <https://doi.org/10.3390/coatings6030032>
- Climent, M. A., Carmona, J., Garcés, P. (2019), *Application of combined electrochemical treatments to reinforced concrete: Electrochemical chloride extraction plus cathodic protection*, Hormigón y Acero, 69 (1), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.05.003>
- Del Moral, B., Galao, O., Antón, C., Climent, M. A., Garcés, P. (2013), *Usability of cement paste containing carbon nanofibres as an anode in electrochemical chloride extraction from concrete*, Materiales de Construcción, 63(309), 39–48. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.031>
- Dugarte, M., Sagüés, A. A., Williams, K. (2015), *Cathodic prevention for reinforcing steel in cracked concrete of chloride contaminated structures*, in: Proceedings of CORROSION 2015 Conference, NACE-2015-6102, Houston, TX, USA, 15–19 March 2015, NACE International, Houston, TX, USA, p. 11.
- Elsener, B., Molina, M., Böhni, H. (1993), *The electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete*, Corrosion Science. 35 (5-8), 1563–1570. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90385-T](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90385-T)
- Garcés, P., Sánchez de Rojas, M. J., Climent, M. A. (2006), *Effect of the reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to the reinforced concrete structures*, Corrosion Science. 48, 531–545. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.02.010>
- Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014), *Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF*, Cement and Concrete Composites. 46, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>
- Glass, G. K., Chadwick, J. R. (1994), *An investigation into the mechanisms of protection afforded by a cathodic current and the implications for advances in the field of cathodic protection*, Corrosion Science, 36 (12), 2193–2209. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(94)90017-5)
- Glass, G. K., Hassanein, A. M., Buenfeld, N. R. (2001), *Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete*, Corrosion Science. 43 (6), 1111–1131. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00133-5)
- Hansson, I. L. H., Hansson, C. M. (1993), *Electrochemical extraction of chlorides from concrete. Part I – A qualitative model of the process*, Cement and Concrete Research. 23 (5), 1141–1152. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90174-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90174-8)
- ISO (2012), *ISO 12696: 2012. Cathodic Protection of Steel in Concrete*, Geneva, Switzerland.
- Liu, Y., Shi, X. (2012), *Modeling cathodic prevention for unconventional concrete in salt-laden environment*, Anti-Corrosion Methods and Materials, 59 (3), pp. 121-131. <https://doi.org/10.1108/00035591211224663>
- Mietz, J. (1998), *Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concretes structures: a state of the art report*, in: Publication Number 24 of the European Federation of Corrosion, IOM Communications Ltd, London, UK, pp. 57
- Page, C. L. (1992), *Interfacial effects of electrochemical protection method applied to steel in chloride containing concrete*, in: D.W.S. Ho, F. Collins (Eds.), Proceedings of the International RILEM/CSIRO/ACRA Conference on Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne, Australia 1992, RILEM, Melbourne, Australia, pp. 179–187.
- Page, C. L. (1997), *Cathodic protection of reinforced concrete. Principles and applications*, in: Proceedings of the International Conference on Repair of Concrete Structures, Svolve, Norway, 1997, pp. 123–132

- Pedefferri, P. (1996), *Cathodic protection and cathodic prevention*, Construction and Building Materials. 10 (5), 391–402. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00017-8)
- Pedefferri, P., Bertolini, L. (2000), *Tecniche elettrochimiche (Electrochemical techniques)*, in: La Durabilità del Calcestruzzo Armato (The Durability of Reinforced Concrete), McGraw-Hill, Milano, Italy, pp. 253–273. (In Italian).
- Pérez, A., Climent, M. A., Garcés, P. (2010), *Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete using a conductive cement paste as the anode*, Corrosion Science. 52 (5), 1576–1581. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.016>
- Polder, R. B. (1998), *Cathodic protection of reinforced-concrete structures in The Netherlands – experience and developments*, Heron 43 (1), 3–14
- Polder, R. B. (2005), *Electrochemical techniques for corrosion protection and maintenance*, in: H. Böhni (Ed.), Corrosion in Reinforced Concrete Structures, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, pp. 215–241
- Sánchez de Rojas, M. J., Garcés, P., Climent, M. A. (2006), *Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete: variables affecting treatment efficiency*, Materiales de Construcción, 56 (284), 17–26. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i284.15>
- Slater, J. E., Lankard, D. R., Moreland, P. J. (1976), *Electrochemical removal of chlorides from concrete bridge decks*, Materials Performance, 56, 21–26.
- Tritthart, J. (1998), *Electrochemical Chloride Removal: An Overview and Scientific Aspects*, The American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, pp. 401–441
- Vennesland, Ø., Climent, M. A., Andrade, C. (2013), *Recommendation of RILEM TC 178-TMC: testing and modelling chloride penetration in concrete, Methods for obtaining dust samples by means of grinding concrete in order to determine the chloride concentration profile*, Materials and Structures. 46, 337–344. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9968-1>
- Vennesland, Ø., Opsahl, O. A., Russell-Rayner, A. P. (1986), *Removal of chlorides from concrete*. European Patent Application number 86302888.2. Publication number 0 200 428.

Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones

R. T. Vasconcelos Fernandes¹, A. Fonseca Cabral¹, G. C. Batista Dantas^{1*},
V. N. Varela Tinoco¹, B. D. Azevedo da Silveira¹, A. M. Sousa Junior¹

* Autor de Contato: gerbeson_dantas@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.521>

Recepção: 30/10/2020 | Aceitação: 16/12/2020 | Publicação: 01/01/2020

RESUMO

Este trabalho objetiva estudar a viabilidade do emprego de Drones para mapeamento e inspeção de manifestações patológicas em pavimentos asfálticos comparando ao método tradicional. Foram estabelecidas parcelas amostrais a cada 20 m, com 6 m de extensão, totalizando 20 estações, as quais tiveram suas manifestações patológicas anotadas e calculado o Índice Global de Gravidade para a área de estudo. Os resultados obtidos pelas metodologias de referência e alternativa foram confrontados em função das patologias identificadas e do tempo gasto nos levantamentos. Os resultados demonstraram viabilidade para emprego de Drones para inspeção de patologias em pavimentos asfálticos, tomando como base a Norma DNIT 006/2003 – PRO, obtendo resultados similares à metodologia tradicional com redução significativa do tempo de operação (33,3%).

Palavras-chave: inspeção rodoviária; defeitos em pavimentos flexíveis; DNIT 006/2003; metodologia alternativa; drones.

Citar como: Vasconcelos Fernandes, R. T., Fonseca Cabral, A., Batista Dantas, G. C., Varela Tinoco, V. N., Azevedo da Silveira, B. D., Sousa Junior, A. M. (2021), "Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 61 – 72, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.521>

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rua Francisco Mota Bairro, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoró - RN, 59625-900, Brasil.

Contribuição de cada autor

Este trabalho constou das seguintes etapas: concepção da pesquisa, levantamento bibliográfico, coleta dos dados, análise dos resultados obtidos em campo, escrita do manuscrito, tradução, revisão do texto e avaliação da pesquisa.

O autor Rogerio Taygra Vasconcelos Fernandes participou do artigo nas etapas de concepção da pesquisa (50%), levantamento bibliográfico (50%), análise dos resultados obtidos em campo (50%), escrita do manuscrito (33,33%) e avaliação da pesquisa (25%). A autora Adriene Fonseca Cabral foi responsável pelas etapas de levantamento bibliográfico (25%), coleta dos dados (90%), análise dos resultados obtidos em campo (50%) e escrita do manuscrito (33,33%). O autor Gerbeson Carlos Batista Dantas participou da etapa de levantamento bibliográfico (25%), escrita do manuscrito (33,33%), tradução (20%) e revisão do texto (50%). O autor Vinícius Navarro Varela Tinoco participou da etapa de coleta dos dados (10%), tradução do trabalho (80%) e revisão do texto (25%). O autor Brenno Dayano Azevedo Da Silveira participou da etapa de concepção da pesquisa (25%) e avaliação da pesquisa (50%). O autor Almir Mariano Sousa Junior participou da etapa de concepção da pesquisa (25%), revisão do texto (25%) e avaliação da pesquisa (25%).

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Mapping of pathological manifestations in asphalt pavement through the use of drones

ABSTRACT

This work objective is to study the feasibility of the Drones' use for mapping and inspecting pathological manifestations in asphalt pavements compared to the traditional method. Sampling plots were established every 20 m, with 6 m extension, making a total of 20 stations, which had their pathological manifestations recorded and calculated with the Global Severity Index for the study area. The results obtained by the reference and alternative methodologies were confronted according to the pathologies identified and the time spent in the surveys. The results showed feasibility in the use of drones for inspection of pathologies in asphalt pavements, based on DNIT 006/2003 - PRO, obtaining results similar to those of the traditional methodology with a significant reduction of the time of operation (33.3%).

Keywords: road inspection; defects in flexible pavements; DNIT 006/2003; alternative methodology; drones.

Mapeo de manifestaciones patológicas en pavimento asfáltico por medio del uso de drones

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad del empleo de Drones para mapear e inspeccionar manifestaciones patológicas en pavimentos asfálticos en comparación con el método tradicional. Se establecieron parcelas muestrales cada 20 m, con 6 m de extensión, totalizando 20 estaciones, las cuales tuvieron sus manifestaciones patológicas anotadas y calculado el Índice Global de Gravedad para el área de estudio. Los resultados obtenidos con las metodologías de referencia y alternativa se confrontaron en función de las patologías identificadas y el tiempo empleado en los levantamientos. Los resultados demostraron viabilidad para el empleo de Drones en la inspección de patologías de pavimentos asfálticos, tomando como base la Norma DNIT 006/2003 - PRO, obteniendo resultados similares a la metodología tradicional con reducción significativa del tiempo de operación (33,3%).

Palavras chave: inspección de carreteras; defectos en pavimentos flexibles; DNIT 006/2003; metodología alternativa; aviones no tripulados.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é um serviço fundamental para desenvolvimento econômico do Brasil, influenciando diretamente em aspectos da produção e consumo, uma vez que o país possui sua infraestrutura orientada para o modal rodoviário (Andrade; Maia; Lima Neto, 2015). Não obstante, este modal corresponde por 61% do transporte de cargas no Brasil e é o principal sistema de deslocamento de passageiros. Quanto aos aspectos social e econômico, este setor é responsável pela geração de mais de 1,5 milhão de empregos diretos e contribui nacionalmente com 12,7% do Produto Interno Bruto de serviços não financeiros (CNT, 2017).

Apesar da sua importância, historicamente pouca atenção tem sido dada a manutenção da infraestrutura das rodovias brasileiras, o que reflete na depreciação da malha rodoviária, quadro que se intensificou com crise econômica pela qual o país passa desde 2013 (CNT, 2017). Como resultado da falta de investimentos, estima-se que mais de 50% das rodovias apresentam algum tipo de patologia, e destas, 19% se encontram em um estado geral de conservação ruim ou péssimo. De acordo com o Fórum Econômico Mundial (FEM), o Brasil ocupa a 111^a posição dentre 138 países avaliados no quesito qualidade da infraestrutura rodoviária (CNT, 2017; FEM, 2016).

Dentre as principais razões pelo o estado deteriorado da malha viária brasileira, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2011) atribuiu à ausência de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), que possibilitaria alcançar a melhor aplicação possível para os recursos públicos disponíveis e oferecer um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico com a crescente demanda brasileira. Sem isso, têm-se a adoção de projetos inadequados para as vias, elaborados sem levantamento detalhado do pavimento ou da situação em que o terreno se encontra (Viera, et al 2016). A base para um SGP eficiente é adoção de métodos adequados para avaliação de pavimentos, por meio da qual se pode verificar a necessidade de manutenção ou reconstrução da via, bem como para determinar se a mesma foi construída segundo as especificações do projeto (Haas; Hudson, 1978; Viera, et al 2016).

A avaliação superficial de pavimentos é usualmente realizada seguindo a norma DNIT 006/2003 - PRO, que utiliza o método do Índice de Gravidade Global (IGG). O referido método possibilita analisar objetivamente o nível de deterioração de um pavimento em função da incidência de defeitos de superfície, indicando suas condições de conservação e auxiliando na tomada de decisões quanto às intervenções necessárias. Ainda que o IGG seja considerado um método eficiente e esteja bastante difundido no meio técnico, o mesmo apresenta como desvantagem a necessidade de levantamentos por caminhamento, o que torna sua aplicação demorada e onerosa para aplicação em grandes áreas.

Uma alternativa para contornar esse problema é o uso dos chamados veículos aéreos não tripulados (VANTs), que podem voar automaticamente ou ser pilotado por meios eletrônicos e computacionais. Estes equipamentos foram idealizados para fins militares, utilizados inicialmente em missões muito perigosas para serem executadas por seres humanos (Resende, 2015). Entretanto, nos últimos anos vem ganhando destaque entre intervenções civis, configurando uma tecnologia emergente na engenharia civil com aplicações que vão desde a fiscalização de obras, até a inspeção de estruturas em ambientes de alto risco (Melo, 2016).

No que tange à aplicação dos VANTs na infraestrutura de transportes, seus sensores embarcados constituem uma nova e econômica fonte de informações e pode auxiliar, inclusive, os esforços de manutenção da estrada (Branco, 2016; Nishar et al., 2016). Apesar disso, pouco tem sido os estudos com esta tecnologia, sobretudo, como ferramenta para avaliação de danos em estradas.

Desta forma, considerando a necessidade de se otimizar o processo de avaliação de rodovias como suporte aos SGP e as potencialidades oferecidas pelos VANTs, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias que possibilitem seu emprego de forma eficiente e tecnicamente adequada (Breen et al., 2015; Nishar et al., 2016). Para tanto, este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade do emprego de Drones para mapeamento e inspeção de patologias em

pavimentos asfálticos, comparando e confrontando seus resultados ao método tradicional de análise.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Utilizou-se como unidade amostral da presente pesquisa um trecho de via asfaltada de pista simples com aproximadamente 0,5 km de extensão que dá acesso ao campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido/UFERSA, no município de Angicos, estado do Rio Grande do Norte - Brasil (Figura 1). O referido trecho, embora de pequena de extensão, mostrou-se ideal para a execução do estudo em razão do grande número de manifestações patológica existentes no pavimento.

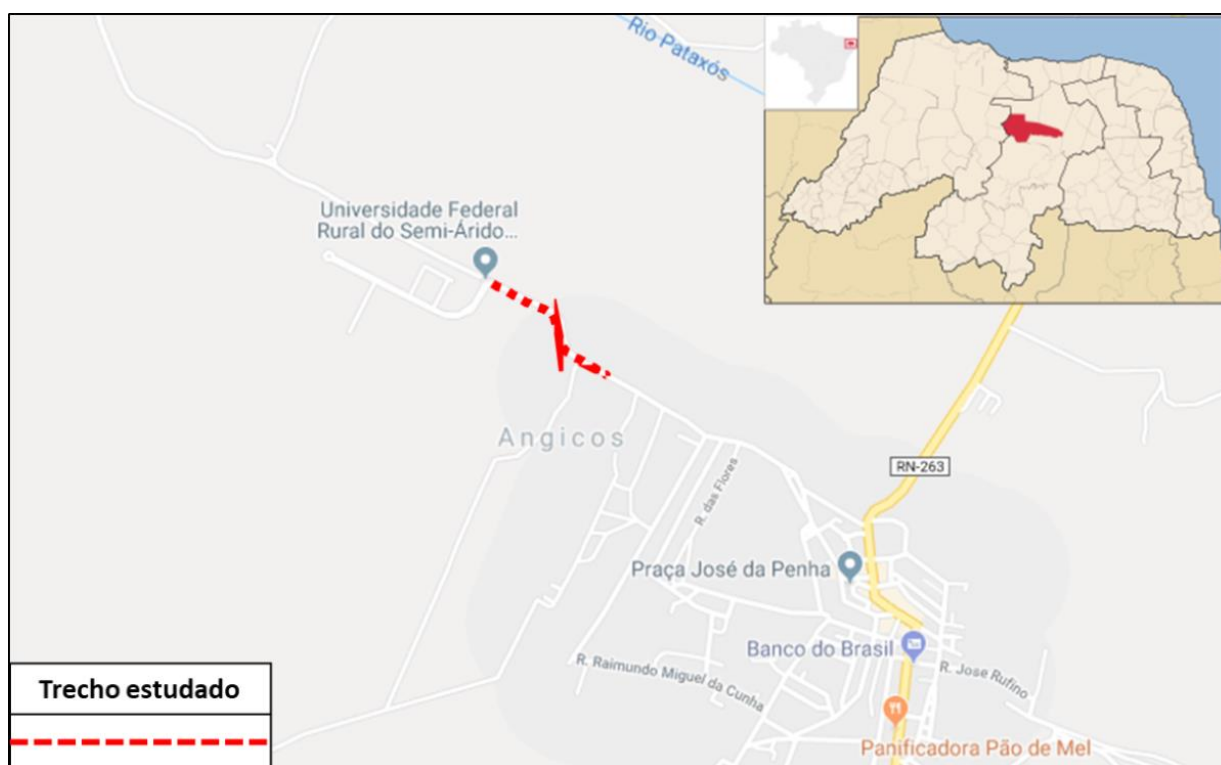


Figura 1. Área de estudo (Lat. 5°39'17.32"S; Lon. 36°36'37.48"O).

2.2 Levantamento das patologias pelo método tradicional (referencia)

Para levantar as patologias existentes na área de estudo, foram estabelecidas parcelas amostrais a cada 20 m (em mãos alternadas), com 6 m de extensão cada uma, conforme estabelecido pela Norma DNIT 006/2003 - PRO (Figura 2). Ao todo foram consideradas 20 estações, as quais tiveram seus defeitos anotados, levando em consideração a seção do terreno e os tipos de manifestação patológica, distinguindo entre trincas, afundamentos plásticos ou consolidados, ondulações, panelas, exsudação, desgastes, remendos e trilhas de rodas. Também foram feitos registros fotográficos de todos os tipos de defeitos encontrados no trecho em estudo.

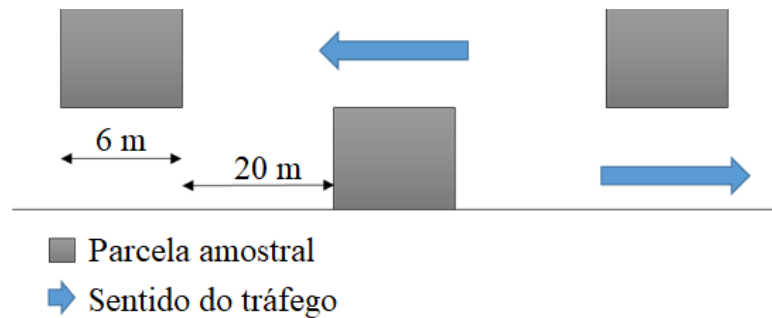


Figura 2. Esquema de distribuição das parcelas amostrais estabelecidas na área de estudo.

2.3 Levantamento das patologias com Drone (alternativa)

Para aquisição das imagens da área de estudo utilizou-se um Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT, do fabricante DJI modelo Phantom 4 PRO (Figura 3). O referido VANT é do tipo multirrotor com peso aproximado de 1,5 kg e é equipado com uma câmera fotográfica de 20 megapixels (capaz de filmar em 4 k/60 fps), com alcance de transmissão de vídeo em 7 km. A escolha do equipamento baseou-se em sua facilidade de uso, estabilidade de voo, qualidade das imagens geradas e preço acessível.



Figura 3. VANT DJI modelo Phantom 4 PRO utilizado no estudo.

Para as etapas de planejamento do voo e posterior composição da ortomagem, utilizou-se o aplicativo Drone Deploy. O mesmo permite a parametrização do plano de voo em função da resolução desejada para as imagens originais, taxa de sobreposição das imagens, linhas de voo e resolução resultante. Os parâmetros de voo utilizados no presente estudo podem ser visualizados na Tabela 1. A ortomagem foi gerada automaticamente pelo aplicativo e exportada para posterior análise (Figura 4).

Tabela 1. Parâmetros de voo utilizados no levantamento

PARÂMETRO	VALOR
Altitude	70 m
Resolução	2,4 cm/pixel
Taxa de cobertura horizontal	65%
Taxa de cobertura vertical	75%
Velocidade de voo	15 m/s
Tempo de voo	6 minutos
Número de fotos	109

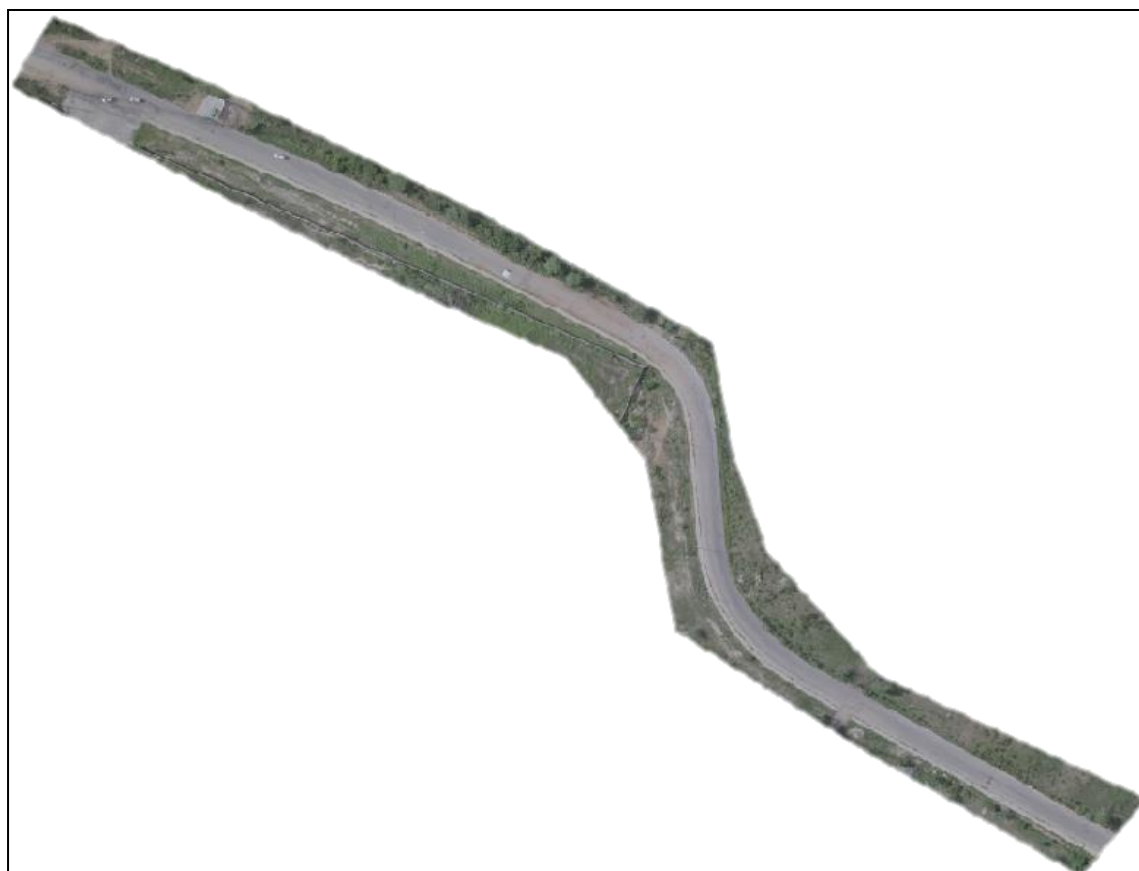


Figura 4. Ortoimagem da área de estudo gerada pelo aplicativo Drone Deploy.

2.4 Cálculo do Índice Global de Gravidade - IGG

Após mapeadas as patologias, calculou-se o Índice Global de Gravidade (IGG) para a área de estudo, seguindo as recomendações da Norma DNIT 006/2003 – PRO. Inicialmente, estimou-se a frequência absoluta (f_a) de ocorrência de cada tipo de manifestação patológica, correspondente ao número de vezes em que a ocorrência foi verificada. Em seguida, obteve-se a frequência relativa (f_r) para cada patologia, através da Equação 1. Para cada tipo de patologia calculou-se o Índice de Gravidade Individual – IGI (Equação 2), que foram posteriormente somados resultando obtendo-se o IGG (Equação 3).

$$f_r = \frac{(f_a \times 100)}{n} \quad (1)$$

Sendo,

f_a – frequência absoluta

n – número de inspeções realizadas (número de parcelas amostrais).

$$IGI = fr \times fp \quad (2)$$

Sendo,

f_r – frequência relativa

f_p – fator de ponderação (de acordo com a tabela do DNIT)

$$IGG = \sum IGI \quad (3)$$

Os resultados obtidos pelas metodologias de referência e alternativa foram confrontados em função do número e tipo das patologias identificadas, bem como em função do tempo gasto para realização dos levantamentos. Por fim, os IGG obtidos foram comparados com a Norma DNIT 006/2003 – PRO, de forma a determinar o conceito de degradação do trecho analisado (Tabela 2).

Tabela 2. Conceito de degradação do pavimento em função do IGG.

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Fonte: NORMA DNIT 006/2003 – PRO

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise comparativa: Inspeção por Drone x Inspeção tradicional

O trecho analisado apresentou uma grande quantidade de patologias em ambos os métodos empregados. A quantificação total de patologias, somando as 20 parcelas avaliadas, demonstrou valores muito próximos para os dois métodos, sendo de 54 para a inspeção tradicional e 53 para a inspeção com o Drone, o que demonstra a viabilidade do emprego do Drone para quantificação de patologias em pavimentos (Figura 5).

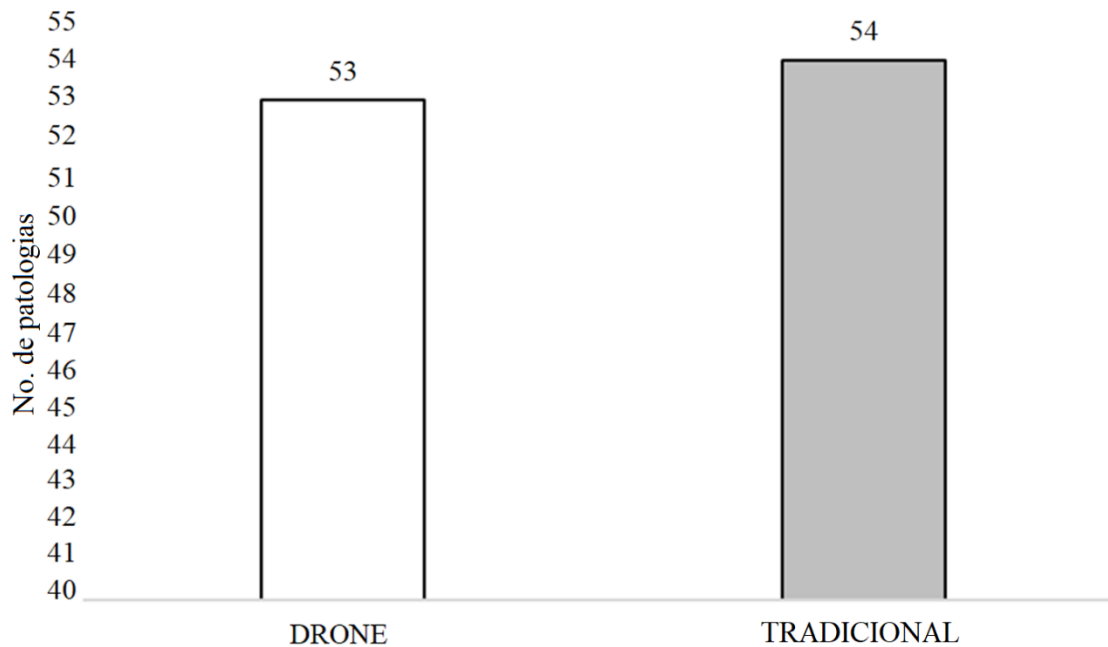


Figura 5. Total de patologias identificadas em função do método de inspeção.

Quanto ao aspecto qualitativo, a inspeção realizada com o Drone possibilitou a identificação de 04 tipos de patologias, sendo estas: panelas (P) - concavidade ou buraco que se forma no revestimento e pode atingir a base; fissuras (F) - caracterizadas como aberturas na superfície asfáltica perceptíveis a olho nu; remendos (R) - defeito caracterizado pelo preenchimento de panelas ou de qualquer outro orifício, buraco ou depressão com massa asfáltica; e escorregamento (E) - deslocamento em relação a camada do pavimento. Em relação aos tipos de patologias, não houve diferença entre o método de inspeção tradicional e o método de inspeção com Drone. Já em relação a quantidade de defeitos por tipo de patologias, houve pequenas diferenças entre os métodos empregados, conforme demonstrado na figura 6.

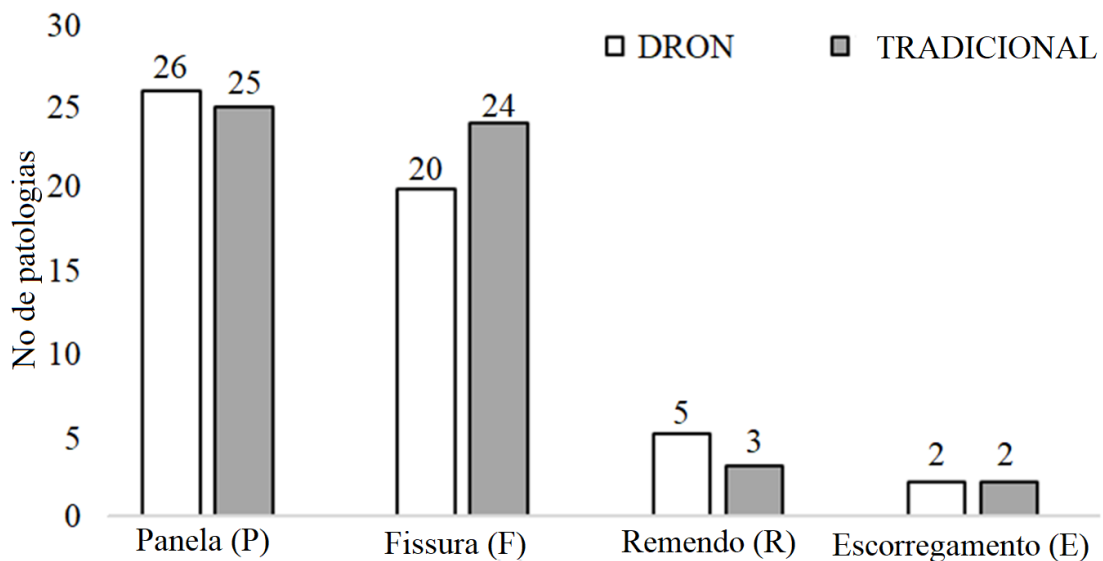


Figura 6. Total de patologias identificadas em função do tipo e do método de inspeção.

Deve-se destacar que a causa mais provável para estas diferenças se dê pelo fato de que alguns tipos de patologias podem ser de difícil identificação pelo uso de imagens obtidas por VANT

devido à qualidade das mesmas, enquanto a inspeção tradicional pode sanar quaisquer dúvidas quanto à ocorrência de uma patologia por tratar-se de uma análise *in loco*. A título de exemplo, pode-se comparar as panelas e as fissuras. No primeiro caso, tem-se maior facilidade na identificação pela própria natureza da patologia, que em geral destaca-se do restante do pavimento. No segundo, têm-se muito mais dificuldade de identificação, precisando por vezes da confirmação através vistoria *in loco*. Na Figura 7 é possível comprar as imagens obtidas com o Drone e por meio do método tradicional, para cada um dos tipos de patologias identificados.

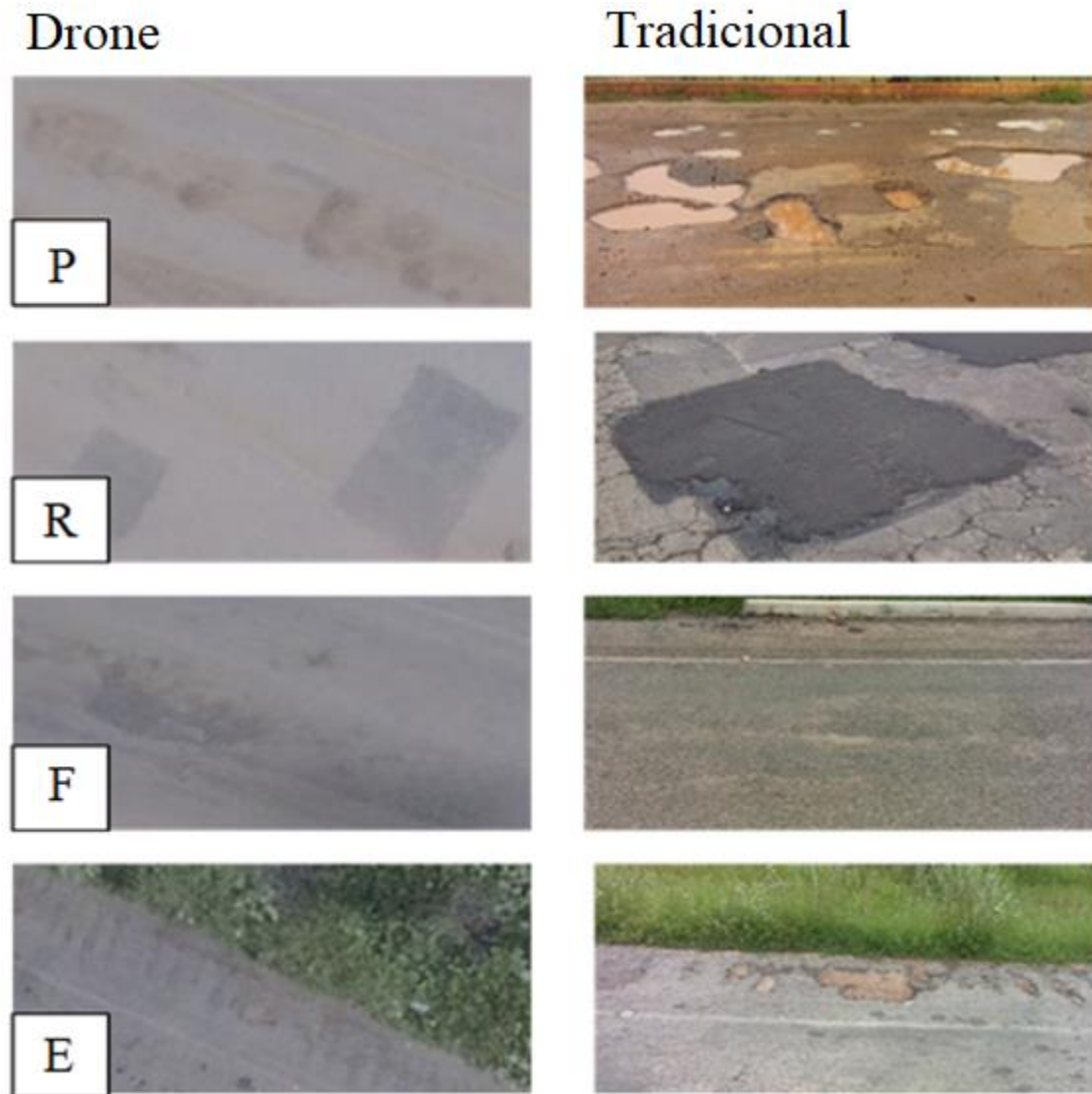


Figura 7. Total de patologias identificadas em função do tipo e do método de inspeção.

No que diz respeito ao tempo gasto para inspeção, constatou-se que a análise realizada com o Drone (6 minutos de voo e 12 minutos para avaliação das imagens) levou menos de 1/3 do tempo gasto para realização da inspeção tradicional (Figura 8). Considerando que no presente estudo avaliou-se um pequeno trecho de 0,5 km, é de se supor que em trechos mais extensos de grandes rodovias esta diferença seja ainda maior, tornando o emprego do Drone cada vez mais atrativo.

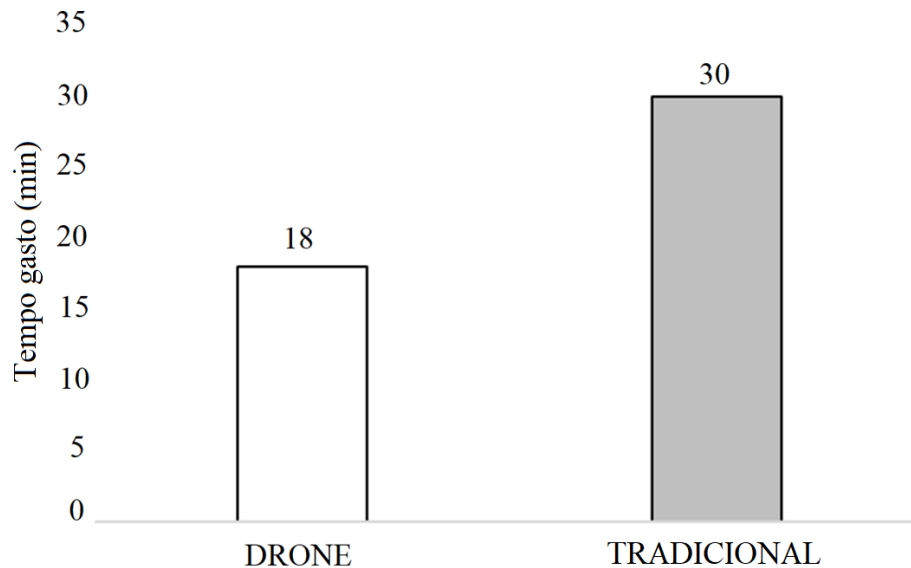


Figura 8. Tempo gasto para realização da inspeção em função da metodologia empregada.

3.2 Análise comparativa: Drone x Inspeção tradicional

O valor obtido para o Índice Global de Gravidade – IGG, foi de 302 para a inspeção realizada com o Drone e 320 para o método tradicional (Figura 9), e em ambos os casos, de acordo com a Norma DNIT 006/2003 – PRO, o trecho avaliado foi considerado péssimo ($IGG > 160$). Um dos pontos que influencia bastante para este resultado, é a presença de uma grande quantidade de Panelas (P), que foi encontrada em todas as parcelas estudadas, sendo esta a patologia que mais impacta o tráfego e contribui para a aceleração para degradação do pavimento. Ainda que se tenha obtido valores distintos, observa-se que a diferença existente não é significativa, demonstrando que a inspeção com o auxílio de Drones é viável tecnicamente.

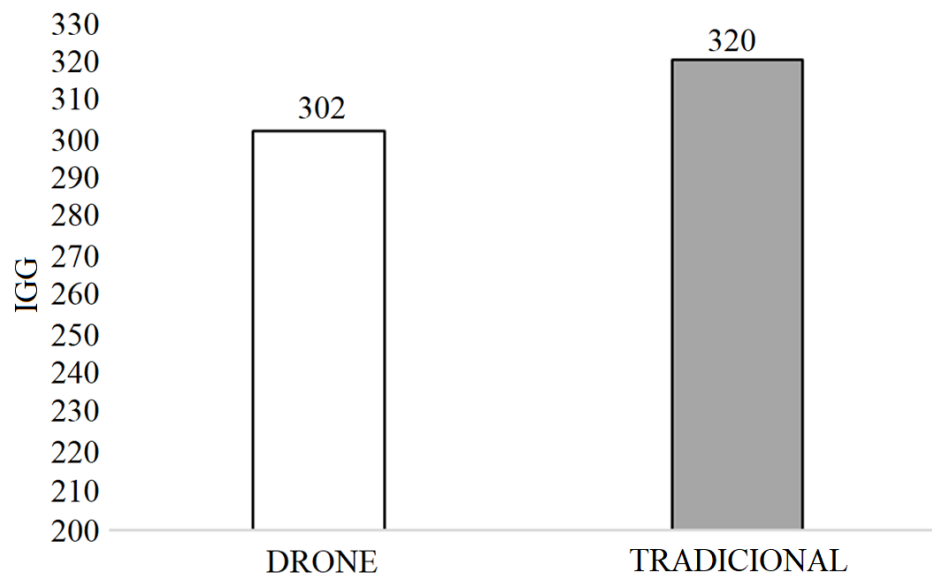


Figura 9. Índice Global de Gravidade - IGG em função da metodologia empregada.

3.3 Análise Geral da Metodologia proposta

A metodologia de uso de VANT para inspeção de pavimento já pode ser observada em trabalhos como o de Parente, Felix e Picanço (2017), onde, assim como no presente trabalho, esta ferramenta foi utilizada em comparação com a metodologia padrão vigente. A adição de uma avaliação comparativa entre o método proposto e o tradicional é essencial para a quantificação estatística da eficácia de qualquer metodologia alternativa proposta. Portanto, outro resultado apontado por este trabalho é uma metodologia de comparação para o uso de VANT em inspeções de estruturas de qualquer tipo, quando comparadas aos métodos tradicionais.

4. CONCLUSÃO

O uso de Drones tem se tornado cada vez mais comum em diversas áreas da engenharia, estimulado principalmente pela popularização desta tecnologia e as diversas possibilidades oferecidas. Entretanto, seu emprego deve ser previamente avaliado e metodologias tradicionais devem ser adequadas para que os resultados fornecidos por estes equipamentos sejam confiáveis. O presente estudo demonstrou ser viável o emprego de Drones para inspeção de patologias em pavimentos asfálticos, tomando como base a Norma DNIT 006/2003 – PRO, obtendo aproximadamente 94,4% de acerto, levando em consideração os resultados com a metodologia tradicional, com redução significativa no tempo de operação com menos de 1/3 do tempo gasto. Ressalta-se ainda que o presente fornece subsídios para o aprimoramento do processo de avaliação de rodovias, possibilitando alcançar a melhor aplicação possível para os recursos públicos disponíveis e oferecer um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico. O método proposto pode ainda ser refinado pelo uso de Drones com sensores multiespectrais, gerando outros resultados que, por meio de imagens infra-vermelho ou tridimensionais, podem agregar valor e informações diversas ao serviço relacionado à inspeções de pavimentos, aumentando também a eficácia da metodologia alternativa.

5. REFERÊNCIAS

- Andrade, M. O., Maia, M. L. A., Lima Neto, O. C. C. (2015), “*Impactos de investimentos em infraestruturas rodoviárias sobre o desenvolvimento regional no Brasil - possibilidades e limitações*”. Transportes v. 23, n. 3. <https://doi.org/10.14295/transportes.v23i3.797>
- Branco, L. H. C. (2016), “*MANIAC: uma metodologia para o monitoramento automatizado das condições dos pavimentos utilizando VANTs*”. 2016. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Breen, B., Brooks, J. D., Jones, M. L. R., Robertsons, J., Betschart, S., Kung, O., Cary, S. C., Lee, C. K., Pointing, S. B. (2015), “*Application of an unmanned aerial vehicle in spatial mapping of terrestrial biology and human disturbance in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica*”, Polar Biology, v.38, n.4, p.573–578. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1586-7>
- Confederação Nacional dos Transportes (2017). *Pesquisa de Rodovias: Principais Dados*”. CNT. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/resumo-para-imprensa>
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2003). DNIT 006/2003 - PRO: “*Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento*”. Rio de Janeiro: 2003. 10p. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit006_2003_pro.pdf. Acesso em: 09 abr. 2018.
- Melo, R.R.S. 2016. “*Diretrizes para inspeção de segurança em canteiros de obra por meio de imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)*”. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

Nishar, A., Richards, S., Breen, D., Robertson, J., Breen, B. (2016), “*Thermal infrared imaging of*

- geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei - Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand*”, *Renewable Energy*, 86, 1256 - 1264. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.042>
- Parente, D. C., Felix, N. C., Picanço, A. P. (2017). *Uso de vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la identificación de patología superficial en pavimento asfáltico*. *Revista ALCONPAT*, 7(2), 160 - 171. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.161>
- Vieira, S., Pinho Júnior, A., Oliveira, F., Aguiar, M. (2016). *Análise comparativa de metodologias de avaliação de pavimentos através do IGG e PCI*. *Conexões - Ciência e Tecnologia*, 10(3), 20-30. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v10i3.799>

Ensaio de controle de concreto projetado com fibra no túnel da linha 12 do metrô CDMX

C. Aire^{1*}, L. Aguilar¹

* Autor de Contato: aire@pumas.iingen.unam.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.493>

Recepção: 18/06/2020 | Aceitação: 31/10/2020 | Publicação: 01/01/2020

RESUMO

Neste artigo três ensaios são avaliados para caracterizar o comportamento do concreto projetado com fibras metálicas no revestimento primário do túnel da linha 12 do metrô CDMX. Três painéis quadrados (UNE 14488-5), três painéis redondos (ASTM C1550) e quatro cilindros para ensaio de Barcelona (UNE 83515) foram feitos. Todos podem ser utilizados como métodos de controle de qualidade para Concreto Reforçado com Fibras (CRF) em construções subterrâneas, porém, constatou-se maior variabilidade nos resultados dos painéis circulares, além de serem os corpos de prova com maior complexidade para sua elaboração e ensaio, portanto, a aplicação do ensaio de Barcelona é recomendada para controle de qualidade no local porque é mais fácil de preparar, manusear e realizar amostragem e ensaio.

Palavras-chave: concreto projetado reforçado com fibra; absorção de energia; ensaio de painel circular, ensaio de painel quadrado; ensaio de Barcelona.

Citar como: Aire, C., Aguilar, L. (2021), "*Ensaio de controle de concreto projetado com fibra no túnel da linha 12 do metrô CDMX*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 73 – 87, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.493>

¹ Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o primeiro autor contribuiu com a campanha experimental (50%), a análise dos resultados e a redação do artigo, o segundo autor com a campanha experimental (50%) e revisão do artigo.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Control tests of shotcrete with fibers in the tunnel of metro line 12 from CDMX

ABSTRACT

This paper three tests are evaluated to characterize the behavior of Shotcrete with metallic fibers in the primary lining of the tunnel on metro line 12 from CDMX. Three square panels (UNE 14488-5), three round panels (ASTM C1550) and four cylinders for Barcelona test (UNE 83515) were made. All can be used as quality control methods for Fiber Reinforced Concrete (FRC) in underground constructions, however, greater variability was found in the results of circular panels, in addition to being the specimens with the greatest complexity for their elaboration and test, therefore, the application of the Barcelona test is recommended for quality control on site because it is easier to prepare, handle and perform sampling and testing.

Keywords: fiber reinforced shotcrete; energy absorption; circular panels test, square panel test; Barcelona test.

Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX

RESUMEN

En este artículo se evalúan tres ensayos para caracterizar el comportamiento del Concreto Lanzado con fibras metálicas en el revestimiento primario del túnel de la línea 12 del metro de la CDMX. Se elaboraron tres paneles cuadrados (UNE 14488-5), tres paneles redondos (ASTM C1550) y cuatro cilindros para ensayo Barcelona (UNE 83515). Todos se pueden utilizar como métodos de control de Calidad para Concretos Reforzados con Fibras (CRF) en construcciones subterráneas, sin embargo, se encontró mayor variabilidad en los resultados de los paneles circulares, además de ser estos los especímenes con mayor complejidad para su elaboración y ensayo, por lo tanto, se recomienda la aplicación del ensayo Barcelona para el control de calidad en obra debido a que resulta más sencilla la preparación, manipulación y ejecución del muestreo y ensayo.

Palabras clave: concreto lanzado reforzado con fibras; absorción de energía; ensayo de paneles circulares, ensayo de paneles cuadrados; ensayo Barcelona.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

Hoje, o uso de fibras no concreto se tornou uma tendência frequente na construção civil. Em nosso país, inicialmente substituíram as telas eletro-soldadas em concreto fundido, pisos industriais e elementos pré-fabricados. A nível internacional, as aplicações desta tecnologia são variadas, entre elas, pavimentos, pisos industriais, apoios de encostas, elementos arquitetônicos e construção de túneis (Gettu et.al., 2004; Kasper et.al., 2008; De la Fonte et.al., 2012). Atualmente, as fibras de aço também são utilizadas na construção de segmentos para revestimento de túneis (Blom, 2002), (Burgers et.al., 2007), (De la Fuente et.al., 2013). No México, as primeiras aplicações foram em pisos industriais, porém, seu uso tem aumentado recentemente, principalmente em obras subterrâneas, tanto em obras civis como em mineração.

Uma das principais propriedades beneficiadas pelo reforço de fibras no concreto é a capacidade de absorção de energia após a fissuração, ou seja, por mais que o elemento fissure, ele pode continuar resistindo à carga e deformar-se sem colapsar, permitindo redistribuição das tensões (De Waal, 2000), melhorando o comportamento antes da fratura, impacto e fadiga (Gopalaratnam e Gettu, 1995). A eficiência das fibras incorporadas na mistura de concreto depende (1) das propriedades da fibra: resistência, rigidez e aderência, (2) da distribuição da fibra: fração relativa, conteúdo e orientação (Zollo, 1997).

Para medir a absorção de energia, foram desenvolvidos diferentes métodos de ensaio padronizados que permitem avaliar o desempenho do concreto reforçado com fibras, para sua aplicação é importante levar em consideração: 1) A complexidade do ensaio; 2) A complexidade da preparação da amostra; 3) A complexidade da execução; 4) A reprodutibilidade do ensaio; 5) Custo e aplicabilidade na prática e aceitação do método de ensaio pelos pesquisadores. (Kooiman, 2000). Os métodos propostos para avaliar a absorção de energia de CRFs devem ser avaliados de acordo com as condições descritas acima para determinar sua aplicação prática como Protocolos de Controle em Obra para CRFs.

Levando em consideração os fundamentos anteriores e a vasta experiência do Instituto de Engenharia da UNAM em pesquisas sobre o CRF, este trabalho apresenta os resultados de um Programa Experimental de avaliação do desempenho do CPRF em um caso prático, a Extensão da Linha 12 do CDMX Metro. A absorção de energia (tenacidade) do concreto do revestimento primário do túnel L-12 e sua complexidade é avaliada para preparar os corpos de prova correspondentes aos ensaios de painel de seção quadrada EN 14488-5 (l 600 × l 600 × h 100 mm), ensaio de painel circular ASTM C1550 (φ 800 × e 75 mm) e ensaio Barcelona UNE 83515 (h 150 × φ 150 mm) proposto por Chen (1970). Optou-se por usar padrões internacionais porque, durante essa campanha experimental, o México não tinha padrões que permitissem avaliar esse tipo de ensaio.

2. TRABALHO DE EXTENSÃO DA LINHA 12 DO METRO CDMX

2.1 Generalidades

O Ministério de Obras e Serviços da Direção Geral de Construção de Obras de Transporte (DGOT) está construindo a extensão da linha 12 do metrô da Cidade do México. É um projeto de infraestrutura que consiste em um túnel de 4,6 quilômetros de extensão no qual estarão localizadas três estações de metrô que conectarão as estações Mixcoac e Observatório, ligando as áreas Leste e Oeste da Cidade do México. Com esta expansão da linha 12 do metrô da Cidade do México, espera-se que o tempo de viagem entre as estações Mixcoac para o Observatório seja reduzido em até 60 por cento.

O projeto executivo, que atualmente está em sua primeira fase, consiste na construção de 13 acessos com profundidades entre 15 e 46,5 m. Os acessos servem para comunicar o túnel com o exterior e ao mesmo tempo introduzir o maquinário, equipamento, pessoal do local e materiais necessários para a construção. O perfil estratigráfico do solo ao longo da linha do projeto é predominantemente de argila arenosa de consistência dura, entretanto, em algumas seções do túnel são encontrados solos moles com pouca estabilidade. Não há presença de nível freático. No caso de solos instáveis, resolve-se com elementos de suporte, como esquadrias metálicas com separação de 0,50 m a 1,00 m entre si, dependendo do tipo de solo mole. Em outros casos, quando ocorre sobre-escavação, resolve-se com produtos de injeção, como caldas de cimento e concreto fluido, cuja escolha é feita de acordo com a magnitude da sobre-escavação.

Para a construção do túnel com 4,6 km de extensão e diâmetro médio de 11 m, utiliza-se o método convencional de escavação mecânica por meio de máquinas de escavação. Os escavadores de parede escavam por meio de uma cabeça rotativa, dotada de dentes cortantes que são montados em um braço mecânico que permite a escavação. O avanço médio da escavação é de 1,5 m, fazendo uma média de dois a três avanços por dia. Após a escavação da seção intermediária superior, é colocado o revestimento primário para dar estabilidade ao solo, que consiste na aplicação de concreto projetado reforçado com fibras de aço (CPRF). A espessura do revestimento primário é de 20 cm, que é colocado em duas camadas de aproximadamente 10 cm cada. Uma geomembrana de PVC é colocada entre a camada de revestimento primária e secundária para evitar possível infiltração de água no revestimento final. O revestimento secundário é de concreto abobadado de 40 cm de espessura. Nesta segunda camada de revestimento, é utilizado o concreto projetado sem fibras; o reforço é com barras de aço.

2.2 Ensaios de controle

A propriedade mais representativa do CPRF é a absorção de energia. Após as fissuras do concreto, as fibras começam a trabalhar durante o processo de fissuração, redistribuindo e controlando a propagação das fissuras à medida que o sistema de revestimento CPRF sofre deformação. A capacidade de carga do CPRF determina o desempenho do sistema de revestimento.

A absorção de energia de CPRF é determinada por meio de ensaios de flexão. Existem dois procedimentos no uso tradicional: a) o ensaio de painel, seção circular ou seção quadrada, e b) o ensaio de viga. Para sua determinação, novos métodos de ensaio padronizados foram desenvolvidos, os quais são utilizados internacionalmente. O ensaio de viga é usado principalmente em aplicações de pavimentação.

O desempenho pós-elástico de painéis circulares / quadrados submetidos a uma carga pontual no centro é representado pela energia absorvida até uma deflexão central especificada. Os métodos de ensaio de resistência à flexão típicos incluem ASTM C1550, para painéis circulares, e EN 14488-5, para painéis quadrados. A determinação da capacidade de absorção de energia é o fator mais importante na avaliação do desempenho do CPRF, que é calculado para uma deflexão especificada, 25 mm em painel quadrado e 40 mm em painel circular.

Outros métodos de avaliação da resistência à flexão são os ensaios de viga. Para isso, são necessários painéis CPRF que são cortados em vigas e ensaiados de acordo com as normas ASTM C1609 e UNE EN-14651, para determinar a tenacidade à flexão.

Um desenvolvimento recente é o Double-Punching Test (DPT), proposto por Chen (1970) padronizado pela UNE 83515, conhecido como ensaio de Barcelona. Este ensaio determina a tenacidade do cilindro que é calculada para uma abertura de fissura circunferencial especificada de 6 mm. Carmona et.al., (2009), considera que este ensaio se caracteriza pela sua baixa complexidade no preparo dos corpos de prova, proporciona um controle sistemático adequado da CRF no local e apresenta uma grande superfície de fratura específica ao longo de sua altura.

Para avaliar o desempenho dos concretos do revestimento primário do túnel L-12, o II-UNAM

realizou ensaios de controle, para os quais foram confeccionados diversos tipos de amostras CPRF obtidas no túnel, e realizada campanha experimental de acompanhamento em todas as operações de lançamento do concreto, com ênfase na amostragem e ensaio de amostras.

A Figura 1 mostra um procedimento típico para colocar o revestimento de aço primário no CPRF no túnel L-12. Quando o caminhão de concreto chega à obra, é obtida uma amostra de concreto sem fibra, a temperatura e o abatimento são medidos para sua rejeição ou aceitação. Em caso de aceitação, a quantidade de fibra de projeto é imediatamente incorporada, permitindo que seja integrada e misturada pelo tempo estabelecido. Terminado o tempo de mistura, o concreto é fornecido ao túnel por meio de uma tubulação, que é recebida por um caminhão betoneira que transporta o concreto do porto até a frente de obra, incorporando-o ao equipamento de vazamento. Os materiais utilizados na fabricação do concreto foram: cimento CPC 40RS (NMX-C-414-ONNCCE), agregados de pedra: areia de andesita, cascalho calcário com tamanho máximo de 10 mm (NMX-C-111-ONNCCE), aditivo de linha tipo B e F (ASTM C 494), aditivo acelerador TamShot 70 AF (ASTM C 1141) e fibra de aço longa de 35 mm, relação de esbeltez (l / \varnothing) 65, resistência à tração de 1.345 (N/m²), na dosagem de 30 kg/m³ de concreto. Uma relação água / cimento 0,50. A resistência à compressão de projeto especificada em 28 dias é $f'c = 250$ kg/cm².



Figura 1. Procedimento para aplicar o revestimento primário do túnel L-12

3. ENSAIO DE PAINÉL QUADRADO – EN 14488-5

Os ensaios de absorção de energia em um painel com seção quadrada de $1\ 600 \times 1\ 600$ mm de seção e h 100 mm de espessura foram realizados de acordo com a norma EN 14488-5. O ensaio consiste em ensaiar painéis quadrados, os quais são submetidos a uma carga central que é aplicada através de uma placa quadrada de 100×100 mm e 20 mm de espessura. A partir do ensaio, obtém-se o comportamento carga-deformação e a partir dessa curva é calculada a capacidade de absorção de energia na faixa pós-fissuração até uma deformação especificado de 25 mm, calculado como a área sob a curva.

Para realizar o ensaio de painel quadrado, está disponível um sistema de controle de malha fechada que permite o controle por deformação e um quadro de reação que é integrado a um atuador e sistema de célula de carga. O atuador tem capacidade de 500 kN, sendo utilizado um transdutor de deformação tipo LVDT para a instrumentação dos painéis. A velocidade de aplicação do deformação do pistão do atuador foi de 1 mm / min. A faixa de medição do LVDT usado é de 100 mm.

Na figura 2 é mostrada a configuração do ensaio de painel quadrado, conforme EN 14488-5. A face do painel que está nivelada corresponde à face superior da amostra no ensaio (EN 14488-5).

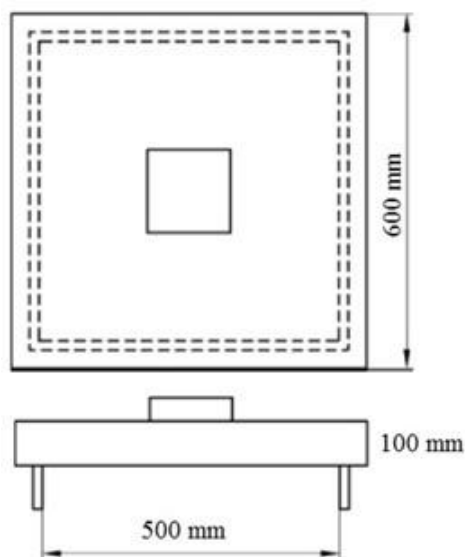


Figura 2. Esquema de configuração do ensaio de painel, segundo a EN 14488-5

Os painéis utilizados para este ensaio correspondem aos corpos de prova PCO-1, PCO-2 e PCO-3, os quais foram obtidos a partir da mesma mistura (lote) de concreto fornecido em campo para o revestimento primário do túnel. Sua ruptura típica se comporta formando duas fissuras principais que atravessam toda a seção do painel, e outras fissuras secundárias, conforme mostrado na figura 3. A ruptura foi gradativa, devido à presença das fibras na matriz do concreto.

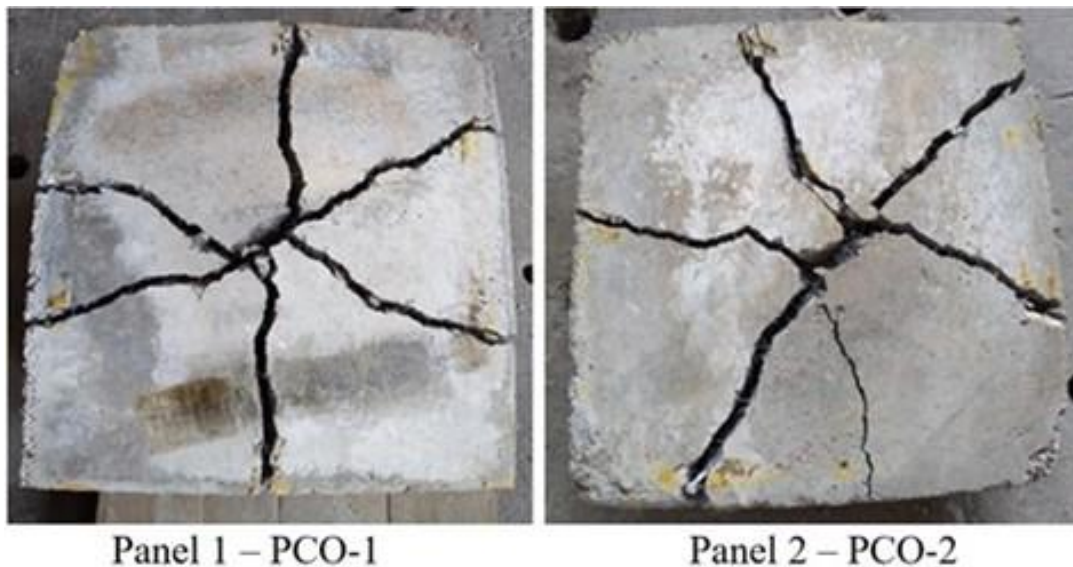


Figura 3. Modo de falha típico dos painéis quadrados ensaiados

A Figura 4 mostra as curvas carga-deformação dos painéis ensaiados. As curvas apresentam comportamento semelhante, independente do painel ensaiado. As curvas apresentam duas seções, uma seção inicial ascendente e uma pós-fissura descendente. Na primeira seção, a carga sobe gradualmente com pequenos incrementos de deformação e ocorrem vários picos. Nesse trecho inicial da curva, a contribuição da fibra não é total, até que ocorra a fissura a partir da qual a fibra atua junto com o concreto. Nesta fase, foram observadas várias quedas de carga, principalmente devido à fissuração do concreto. Porém, há uma recuperação em todos os casos até atingir um valor de carga máxima, a partir do qual ocorre uma diminuição gradativa no pós-fissuração. O ensaio

termina atingindo uma deformação mínima de 25 mm. A Figura 4 mostra que o comportamento pós-fissuração é muito semelhante para ambos os painéis, além disso, os valores de carga máxima são bastante semelhantes; portanto, estima-se que a absorção de energia apresenta valores semelhantes.

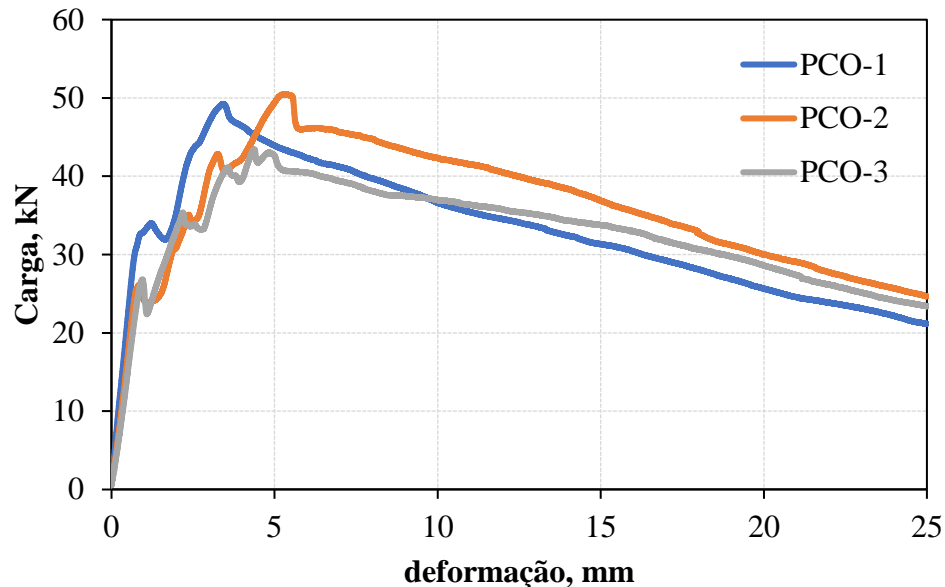


Figura 4. Curvas de carga-deformação dos painéis quadrados ensaiados

A tenacidade foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central de 25 mm, conforme especificado na EN 14488-5. Os resultados são apresentados na tabela 1. Os resultados mostram que a tenacidade média (absorção de energia) dos painéis ensaiados é de 843,14, com um coeficiente de variação de 5,27%. A repetibilidade dos resultados é bastante aceitável.

Tabela 1. Resultados de tenacidade, $T_{\delta 25\text{mm}}$

ID	Painel	U	Tenacidade	média
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-1	Joules	820.83	$T_{\text{prom}} = 843.14\text{ J}$ C.V. = 5.27%
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-2	Joules	894.29	
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-3	Joules	814.31	

Esses painéis de ensaio apresentam alto grau de complexidade na etapa de amostragem, transporte e ensaio por se tratarem de corpos de prova com peso médio de 80 kg cada, além de necessitarem de pelo menos duas pessoas treinadas para o preparo e manuseio das amostras durante a amostragem e ensaio. O excedente de concreto para sua elaboração deve ser considerado, em torno de 0,1 m³ para os três corpos de prova, situação que representa um custo extraordinário no consumo de concreto, que será afetado pela periodicidade do ensaio, porém, sua aplicação será determinada se o projeto especifica seu uso no Protocolo de Controle como método de avaliação, ou caso não, utilize outro ensaio se sua correlação com ele for conhecida.

4. ENSAIO DE PAINEL CIRCULAR – ASTM C1550

Os ensaios de absorção de energia em um painel de seção circular de $75 \times 800 \phi$ mm foram realizados de acordo com a norma ASTM C1550. O ensaio permite caracterizar o comportamento à flexão do concreto expresso como absorção de energia na faixa pós-fissuração.

Para a realização dos ensaios, existe um dispositivo de montagem dos painéis que atende às especificações da norma. O dispositivo é constituído por uma placa circular sobre a qual são colocados três pontos de apoio diametralmente equidistantes. Esses três pontos de apoio são colocados simetricamente circunscritos em um círculo de 750 mm de diâmetro, e devem suportar a aplicação de uma carga vertical de 100 kN no centro do painel e ser suficientemente rígidos para que nenhuma deformação inaceitável ocorra durante o ensaio. Esses suportes são constituídos por bases de aço piramidais com dispositivos nos vértices que atuam como uma junta esférica e permitem a rotação livre da placa durante o ensaio.

O painel se apoia sobre os três pivôs dispostos simetricamente e uma carga pontual é aplicada no centro do painel, conforme mostrado na figura 5. A carga é aplicada na face nivelada, com a face moldada do painel apoiada nos três pivôs. Durante o ensaio, a carga e o deformação são registrados continuamente e a curva carga-deformação é obtida, a partir da qual pode ser obtida a absorção de energia.

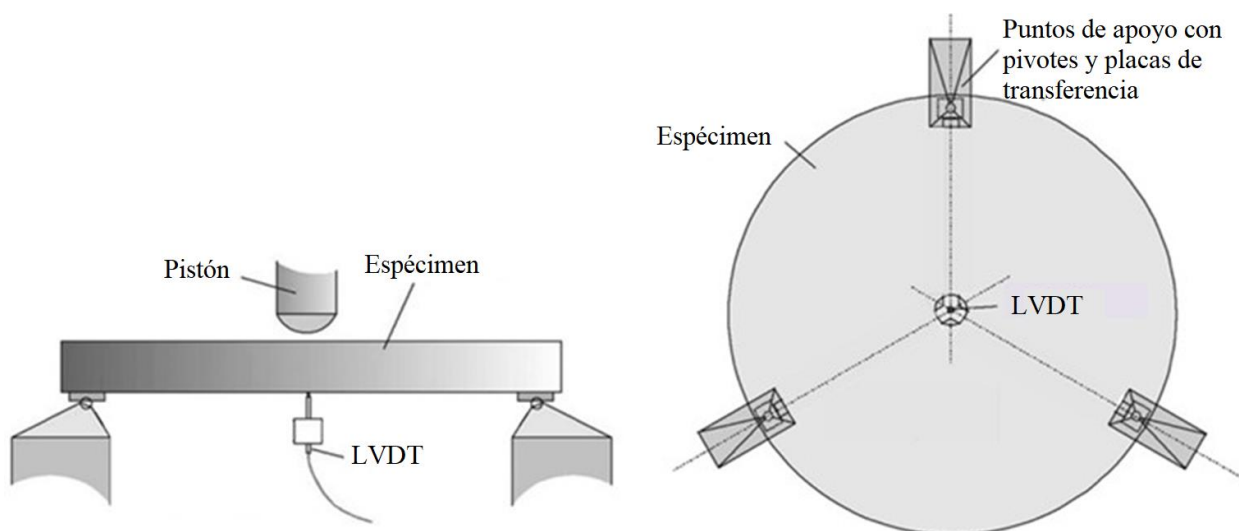


Figura 5. Esquema de configuração do ensaio de painel, segundo a ASTM C1550

A informação da resposta carga-deformação completa do ensaio do painel circular requer também um equipamento de ensaio bastante rígido e um sistema de controle que permita obter informações no pós-pico (pós-fissuração), para o qual, foi utilizado o mesmo kit de ensaio de painel quadrado. A velocidade de deformação aplicada foi de 4 mm/min, conforme estabelecido pela ASTM C1550. O ensaio termina quando uma deformação mínima de 40 mm é alcançada. A instrumentação foi realizada com transdutor de deformação tipo LVDT de faixa de 100 mm, que é posicionado no centro da parte inferior do painel. A absorção de energia, calculada como a área sob a curva carga-deformação, é determinada para 5, 10, 20 e 40 mm de deformação, conforme especificado pela norma.

Painéis ensaiados com carga de ponto central tipicamente falharam em formar três fissuras radiais começando no centro do painel e dividindo o corpo de prova em três seções, como mostrado na figura 6. O modo de falha foi gradual, devido à presença das fibras na matriz de concreto, ao contrário do ensaio de painéis sem fibra, onde a partir de experiências anteriores observou-se que

a falha é repentina (Aire e Rodríguez, 2011).

De acordo com ASTM C1550, um ensaio bem-sucedido envolve um modo de falha que inclui pelo menos três trincas radiais. Ocasionalmente, os corpos-de-prova apresentam um modo de falha envolvendo uma única fissura, que se caracteriza pela baixa absorção de energia. O resultado deste ensaio deve ser descartado e apenas o resultado de dois ensaios mostrando um modo de falha que inclui três trincas radiais deve ser considerado. Neste estudo os três painéis apresentaram três fissuras radiais.

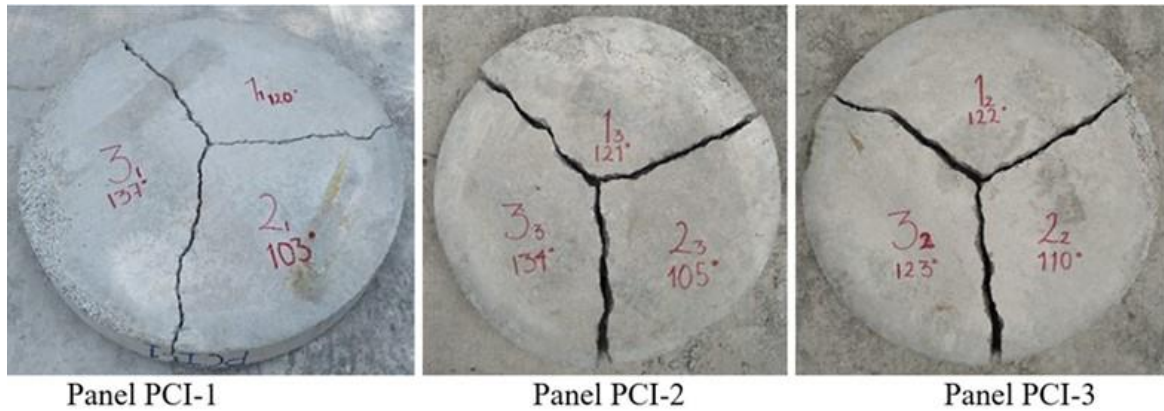


Figura 6. Modo de falha de painéis circulares

A Figura 7 mostra a configuração do ensaio de painel circular e a figura 8 mostra as curvas carga-deformação a partir dos resultados obtidos. No México, o método de ensaio equivalente de ASTM C 1550 é regulamentado em NMX C539 (NMX 539, 2017). As curvas carga-deformação apresentam uma seção ascendente inicial onde a carga sobe gradativamente com pequenos incrementos de deformação. Nesta seção linear inicial a carga é suportada pelo concreto e a contribuição da fibra é mínima ou nula. Nesta primeira fase, a curva atinge um pico máximo (carga máxima), e imediatamente se inicia o processo de fissuração do concreto e a carga é transmitida às fibras, até que finalmente elas absorvem toda a carga e as fibras trabalham em conjunto com o concreto. A fase pós-fissuração é caracterizada por uma diminuição gradual da carga e deformação. Os três painéis têm capacidades residuais semelhantes.



Figura 7. Ensaio de painel de seção circular, ASTM C1550

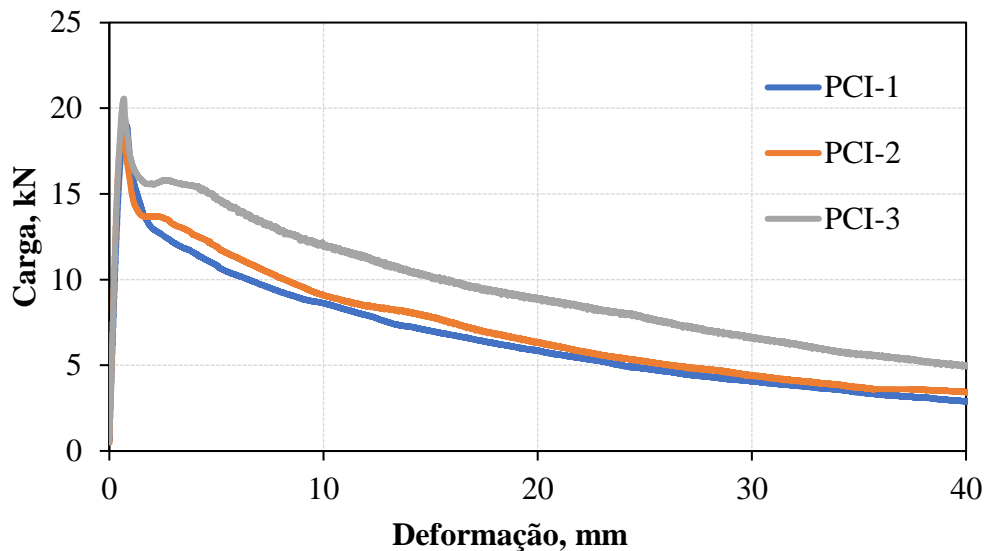


Figura 8. Curva carga vs deformação de painéis circulares

A tenacidade foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central especificado na norma. Os resultados são mostrados na Tabela 2. A absorção de energia foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central especificado em ASTM C1550. Os resultados são apresentados na tabela 2. A absorção média de energia para os painéis ensaiados é de 311 Joules para um deformação de 40 mm, com um coeficiente de variação de 19,7%.

Tabela 2. Resultados de tenacidade, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$

ID	U	$T_{\delta 5\text{ mm}}$	$T_{\delta 10\text{ mm}}$	$T_{\delta 20\text{ mm}}$	$T_{\delta 40\text{ mm}}$
PCI-1	Joules	63.8	111.6	182.4	265.6
PCI-2	Joules	66.7	118.8	196.0	286.9
PCI-3	Joules	77.2	143.3	246.1	380.8
T_{prom}	Joules	69.2	124.5	208.2	311.1
CV	%	10.2	13.3	16.1	19.7

circulares, da mesma forma que os quadrados, também apresentam alto grau de complexidade na sua etapa de amostragem, transporte e ensaios por serem corpos de prova com peso médio de 100 kg cada, além de necessitarem de pelo menos duas pessoas treinadas para a preparação e manuseio de amostras durante a amostragem e ensaio. O processo de arrasamento é tedioso e dependendo das características da obra, a sua transferência para as salas de cura requer mais equipamentos, devendo também ter espaço suficiente para ser armazenada e curada. Deve-se considerar o excedente de concreto para sua elaboração, em torno de 0,15 m³ para os três corpos de prova, situação que representa um custo extraordinário no consumo de concreto, que será afetado pela periodicidade do ensaio, porém, sua aplicação será determinada se o projeto especifica seu uso para o Protocolo de Controle como método de avaliação, ou caso não, utilize outro ensaio caso seja conhecida sua correlação com este.

5. ENSAIO BARCELONA – UNE 83515

O ensaio de Barcelona é um método de ensaio para determinar a resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual do concreto reforçado com fibras por meio de um ensaio de puncionamento duplo. É aplicável a corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados ou extraídos de uma estrutura, com altura aproximadamente igual ao seu diâmetro. Os elementos essenciais para a aplicação deste método de ensaio são: a corrente circunferencial com extensômetro, discos de carga (punções) e discos de montagem. Os corpos de prova podem ser obtidos por moldagem direta de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 150$ mm, de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 300$ mm e posterior corte para obter $h / \phi = 1$, ou por extração de núcleo de $\phi 150$ mm de estruturas reais, o que é uma vantagem do método quando é necessário avaliar o desempenho do concreto colocado no local. O ensaio é realizado de acordo com a norma UNE 83515. A Figura 9 mostra um diagrama da configuração do ensaio Barcelona. A carga deve ser aplicada uniformemente com uma velocidade de descida do pistão da prensa de $0,5 \pm 0,05$ mm / min durante todo o ensaio. Isso é considerado concluído quando a deformação circunferencial total atinge pelo menos 6 mm.

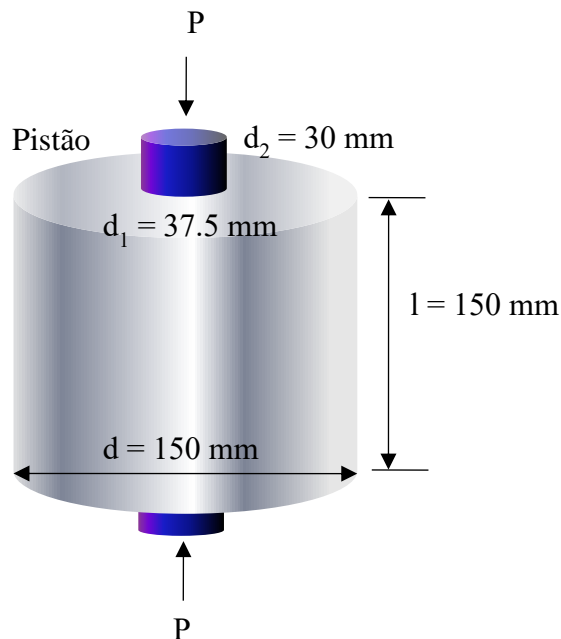


Figura 9 Configuração do ensaio Barcelona – UNE 83515

Para a realização deste ensaio, foi realizada uma amostragem numa calha de madeira $650 B \times 350 b \times 150 h$ mm, da qual foram extraídos 4 testemunhos. Para a extração dos testemunhos foi utilizada uma extratora, como a mostrada na Figura 10. A verticalidade do núcleo foi garantida por meio do nivelamento da superfície de apoio. A carga foi aplicada na face nivelada.

A Figura 11 mostra a configuração do ensaio. O método de ensaio equivalente de UNE 83515 no México é NMX C538 (NMX C538, 2017).



Figura 10. Extração de testemunhos para o ensaio de Barcelona.



Figura 11. Ensaio de dupla punção, configuração, UNE 83515

A falha do cilindro no ensaio de Barcelona apresenta 3 trincas que cruzam toda a altura do cilindro, conforme mostrado na figura 12.



Figura 12. Modo de falha típico de cilindros, Ensaio de Barcelona.

A Figura 13 mostra as curvas circunferenciais de deformação de carga dos cilindros ensaiados. As curvas apresentam uma deformação quase nula do início da carga até a carga máxima. Ao atingir a carga máxima, aparecem as primeiras fissuras e pós-fissuras. A carga diminui até uma certa abertura circunferencial e as fibras começam a funcionar. A carga é recuperada e o comportamento residual é apresentado.

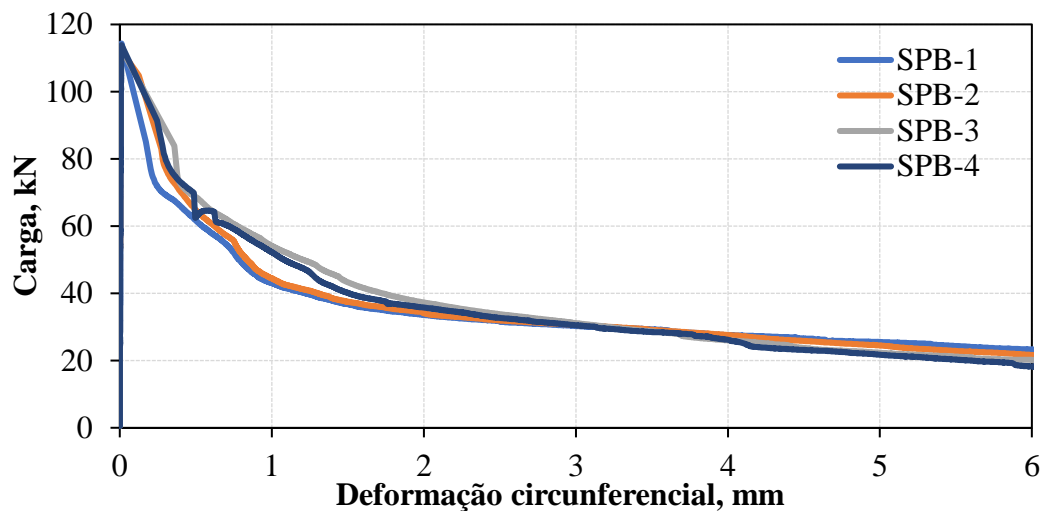


Figura 13. Curvas de carga-deformação circunferencial do ensaio de Barcelona

A Tabela 3 mostra os resultados de tenacidade dos cilindros ensaiados. O coeficiente de variação dos resultados varia entre 2,5% e 6,8%.

Tabela 3. Resultados de tenacidade, $T_{\delta 2mm}$, $T_{2.5mm}$, $T_{\delta 4mm}$ y $T_{\delta 6mm}$

ID	U	SPB-1	SPB -2	SPB -3	SPB -4	Prom	CV %
$T_{ct 2 mm}$	Joules	102.9	108.9	120.2	115.5	111.9	6.8
$T_{ct 2.5mm}$	Joules	119.2	125.5	137.9	132.5	128.8	6.3
$T_{ct 4 mm}$	Joules	163.8	170.2	182.8	177.2	173.5	4.8
$T_{ct 6 mm}$	Joules	214.7	219.1	227.9	220.5	220.5	2.5

Os cilindros utilizados para este ensaio têm a vantagem de serem obtidos de calhas no caso do concreto lançado, extraíndo-os de um elemento fundido ou confeccionando os próprios cilindros com moldes específicos, portanto, a sua obtenção tem um baixo grau de complexidade na etapa de amostragem, transporte e ensaio, por se tratarem de corpos de prova com peso médio de 5 kg cada, além de exigirem uma pessoa treinada para o preparo e manuseio das amostras durante a amostragem e os ensaios. O excedente de concreto para sua preparação é mínimo e sua aplicação será determinada se o projeto especificar seu uso para o Protocolo de Controle como método de avaliação.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos para os três ensaios propostos em termos de absorção de energia, a análise estatística encontrou maior variabilidade nos resultados dos painéis circulares e menor variabilidade nos cilindros para o Ensaio de Barcelona. Essa situação pode ser atribuída ao motivo de maior espessura, maior concentração de fibras no núcleo de concreto.

As amostragens realizadas até o momento na obra de ampliação do L12 representam um projeto piloto para avaliação da aplicação dos métodos, os quais não são especificados para o projeto, portanto, não se pode afirmar que os valores obtidos estejam em conformidade com os parâmetros especificados em termos de absorção de energia para CPRFs de aço, no entanto, representam um divisor de águas para a implantação de um Protocolo de Controle que avalia o desempenho do CPRF e permite conhecer os diferentes cenários, facilidades, dificuldades e outros aspectos que se apresentam in loco durante o desenvolvimento das amostragens, resultados de ensaios e análises

de todos os componentes envolvidos.

Derivado da campanha experimental aplicada ao caso prático da Extensão da Linha 12 do Metrô da Cidade do México, identifica-se que os processos de amostragem, preparação de corpos de prova e ensaios para o Ensaio de Barcelona (UNE 83515) são mais práticos desde o início. do ponto de vista das condições da obra, pois são corpos de prova de menor peso e menores dimensões, se comparados aos painéis, portanto, são feitos em menos tempo e quando você tem bastante experiência, manuseio, preparação e ensaios, pode ser feito por uma só pessoa.

O aumento da utilização do CRF, a experiência adquirida nestes trabalhos de campo e pesquisas relacionadas, têm motivado o setor privado, empresas de construção e instituições acadêmicas como o Instituto de Engenharia da UNAM a levantar, propor e desenvolver métodos de ensaio avaliar o CRF com base em normas internacionais, com o uso de informações em aplicações locais. Que vai promover um novo sistema de controle de qualidade para concreto reforçado com fibra em obras subterrâneas no México.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Direção Geral de Construção de Obras de Transporte da Cidade do México as facilidades oferecidas durante os trabalhos de extração de amostras no túnel, que permitiram a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Aire, C., Rodríguez, M. (2011). *Estudio de las propiedades mecánicas básicas de concreto con fibras sintéticas*. Proyecto de investigación. Instituto de Ingeniería UNAM P1503. Informe elaborado para EUCLID. Junio. p. 78.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *UNE EN 14488-5: Ensayos de hormigón proyectado. Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía de probetas planas reforzadas con fibras*. Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *UNE EN 14651: Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*. Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (2008). *UNE 83515: Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*, Madrid, España.
- ASTM International. (2013). *ASTM C494/C494M-13 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0494_C0494M-13
- ASTM International. (2015). *ASTM C 1141/C1141M-15 Standard Specification for Admixtures for Shotcrete*. https://doi.org/10.1520/C1141_C1141M-15
- ASTM International. (2012). *ASTM C1550-12 Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*. <https://doi.org/10.1520/C1550-12>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1609/C1609M-12 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-12
- Blom, C. B. M. (2002). “*Design philosophy of concrete linings in soft soil*”. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, p. 6
- Burgers, R., Walraven, J., Plizzari, G., Tiberti, G. (2007). “*Structural Behaviour of SFRC tunnel segments during TBM operations*”. Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, London, England., pp. 1461-1467.

- Carmona, S., Aguado, A., Molins, C., Cabrera, M. (2009), *Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona)*. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N° 2, pp. 119-140. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732009000200001>
- Chen, W. F. (1970). “*Double punch test for tensile strength of concrete*”. ACI Journal, Proceedings Vol. 67, pp. 993-995.
- De La Fuente, A., Blanco, A., Pujadas, P., Aguado, A. (2013). *Advances on the use of fibres in precast concrete segmental*. Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling & Construction. International Federation for Structural Concrete, pp. 691-694.
- De La Fuente, A., Pujadas, P., Blanco, A., Aguado, A. (2012). *Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings*. Tunneling and Underground Space Technology. Volumen 27, pp. 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>
- De Waal, R. G., (2000). “*Steel fibre reinforced tunnel segments for the application in shield driven tunnel linings*”, Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- Gettu, R., Barragan, B., Garcia, T., Ramos, G., Fernandez, C., Oliver, R. (2004). *Steel fiber reinforced concrete for the Barcelona metro line 9 tunnel lining*, in: Di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G.A. (Eds.), 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes RILEM PRO 039, Bagneux, pp. 141-156.
- Gopalaratnam V., Gettu R. (1995). *On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concrete*. International Journal Cement and Concrete Composites. Vol. 17, pp 239-254. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)99506-O](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)99506-O)
- Kasper, T., Edvardsen, C., Wittneben, G., Neumann, D. (2008). *Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with fibre reinforced concrete segments*. Tunneling and Underground Space Technology. Volumen 23, pp 574-587. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.001>
- Kooiman, A. G. (2000). “*Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design*”, Doctoral Thesis, Delf University of Technology.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2018). *NMX-C-111-ONNCCE-2018, Industria de la Construcción – Agregados para concreto Hidráulico – Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-538-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción – Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Resistencia al Agrietamiento, Tenacidad y Resistencia Residual a Tensión – Método de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-539-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción – Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Tenacidad a la Flexión Utilizando el Panel Circular con carga central – Método de Ensayo*. México.
- Zollo, R. F. (1997). *Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development*. Cement and Concrete Composites. Volumen 19, pp. 107-122. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)

Inspeção de fachadas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT): estudo exploratório

R. D. B. Ruiz^{1*} , A. C. Lordsleem Júnior¹ , J. H. A. Rocha² 

* Autor de Contato: Ramiro.DBR@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>

Recepção: 07/10/2020 | Aceitação: 16/12/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

O objetivo desta pesquisa consistiu em avaliar o uso de VANT como ferramenta visual para a inspeção de manifestações patológicas em fachadas a través de um estudo exploratório. Na atualidade, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) assumem uma crescente relevância na construção civil como novo mecanismo de obtenção de dados e inspeção visual, otimizando o tempo. A estratégia de pesquisa considera três etapas distintas: revisão bibliográfica, o procedimento experimental e, finalmente o processamento de dados, objetivando verificar a viabilidade do procedimento de inspeção. Evidencia-se a conveniência de utilização do VANT particularmente onde o acesso é difícil, o que pode reduzir tempo, custos e gerar maior segurança, além da reconstrução 3D da edificação para ser inspecionada e gerar diagnósticos mais certos.

Palavras-chave: VANT; inspeção predial; inspeção visual; monitoramento; fotos aéreas.

Citar como: Silva, Ruiz, R. D. B., Lordsleem Júnior, A. C., Rocha, J. H. A. (2021), “*Inspeção de fachadas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT): estudo exploratório*”, Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 88 – 104, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>

¹ Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor R.D.B Ruiz contribuiu com ideia original, experimentação, coleta de dados, redação do trabalho e a discussão de resultados, o autor A.C. Lordsleem Júnior contribuiu com redação do trabalho e a discussão de resultados, e o autor JHA Rocha contribuiu com a revisão da redação do trabalho e a discussão de resultados.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Inspection of facades with Unmanned Aerial Vehicles (UAV): an exploratory study

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as a visual tool for the inspection of pathological manifestations in facades, through an exploratory study. Currently, the relevance of UAVs is growing as a new mechanism for obtaining data and visual inspection of buildings, optimizing time. The research strategy had three distinct steps: a literature review, an experimental procedure, and data processing, aiming to verify the viability of the inspection procedure. There is evidence of the convenience of UAV use, particularly where access is difficult, which reduces time and cost, generates greater security, and allows 3D reconstruction of the building under inspection, generating more accurate diagnoses.

Keywords: UAV; property inspection; visual inspection; monitoring; aerial photos.

Inspección de fachadas con Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT): estudio exploratorio

RESUMEN

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el uso de VANT como herramienta visual para la inspección de manifestaciones patológicas en fachadas a través de un estudio exploratorio. En la actualidad, los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) asumen una creciente relevancia en la construcción civil como nuevo mecanismo de obtención de datos e inspección visual, optimizando el tiempo. La estrategia de investigación considera tres etapas distintas: revisión bibliográfica, el procedimiento experimental y, finalmente, el procesamiento de datos, con el objetivo de verificar la viabilidad del procedimiento de inspección. Se evidencia la conveniencia de utilizar el VANT particularmente donde el acceso es difícil, lo que puede reducir tiempo, costos y generar mayor seguridad, además de la reconstrucción 3D de la edificación para ser inspeccionada y generar diagnósticos más certeros.

Palabras clave: VANT; inspección predial; inspección visual; monitoreo; fotos aéreas.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

A inspeção visual de fachadas das edificações é uma atividade que tem como objetivo avaliar o estado de conservação da vedação vertical e os diferentes elementos que a compõem, fornecendo diretrizes para uma manutenção eficaz e de custo-benefício adequado. Com essa prática pode-se garantir o bom funcionamento do sistema de vedação vertical, permitindo cumprir as funções para as quais foi construído e, possivelmente, ser estendida a sua vida útil (Pires et al., 2015; Flores-Colen et al., 2008).

Para esse fim, a metodologia eficaz que reduz tanto o tempo quanto o custo dessa atividade é a inspeção visual com uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) (Melo e Costa, 2015). Com ajuda dessa tecnologia é possível realizar uma filmagem completa e captura de fotografias em alta resolução HD (High Definition) de todos os principais pontos investigados. A investigação detalhista pode registrar problemas não observados a olho nu visto do terreno, como por exemplo: infiltrações, descolamento ou furos no revestimento e/ou fissuras e trincas na fachada (Tondelo e Barth, 2019).

Atualmente, no Brasil a inspeção visual de edificações é realizada, em sua maioria, pelo método tradicional. O profissional desta atividade profissional (alpinismo industrial) pode realizar a verificação visual e o registro fotográfico dos principais pontos a serem analisados, no entanto, as variáveis custo e tempo são superiores quando comparadas a vistoria com uso de VANT. Conforme dados divulgados pelo Ministério Público, 40% dos acidentes de trabalho no Brasil estão relacionados a quedas de trabalhadores em altura (EXAME, 2018).

Assim, esta ferramenta denominada VANT refere-se a uma classe de aeronaves pilotadas remotamente ou de forma automática através da utilização de coordenadas pré-definidas, sendo uma tecnologia emergente conhecida por seu papel em aplicações militares (Irizarry e Costa, 2016). Mais recentemente, tanto no Brasil quanto em outros países o uso potencial desses veículos aéreos em ambientes civis vem se tornando cada dia mais comum em áreas como agricultura, silvicultura, arqueologia, arquitetura e construção civil (Roca et al., 2013; Máthé e Buşoniu, 2015; Morgenthal e Hallermann, 2015; Nikolic et al., 2013; Hung et al., 2018; Yang et al., 2015; De Melo et al., 2017; Falorca e Lanzinha, 2020).

Apenas no ano de 2017 foi publicada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) a normativa brasileira que regula os requisitos gerais para as aeronaves não tripuladas de uso civil, a norma Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94 (ANAC, 2017). Este regulamento especial estabelece as condições para a operação de VANT no território brasileiro considerando o estágio do desenvolvimento atual, objetivando-se promover seu uso seguro e sustentável.

O uso de VANT na indústria da construção civil ainda é limitado (Melo e Costa, 2015), embora perceba-se que essa tecnologia pode ser utilizada de diversas maneiras. Neste contexto, merece uma destacada atenção a realização da inspeção visual em construções civis de grande porte para verificar as condições de desempenho e determinar medidas preventivas e corretivas que se fizerem necessárias, em virtude da inerente complexidade (altura, tamanho, dificuldades de acesso e condições exposição). O VANT pode reduzir o tempo destas operações de monitoramento, bem como, auxiliar em outros processos de inspeção que podem colocar em risco a vida humana (Álvares et al., 2016).

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é avaliar uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) como ferramenta visual para inspeção de manifestações patológicas em fachadas a través de um estudo exploratório, com o intuito de verificar a viabilidade de sua utilização e visando o desenvolvimento de diretrizes que integram a coleta de imagens aéreas, processamento de dados e análise visual.

2. VANT NA INSPEÇÃO VISUAL

Existem diferentes tipos de VANT úteis para o propósito da inspeção visual na indústria da construção civil. Dentre eles, os sustentados por meio de asas rotatórias, quando comparados com os de asas fixas, permitem deslocamentos mais rápidos e maior versatilidade nos voos, eles são efetivos na coleta de imagens horizontais em áreas de mediana extensão como foi aplicado no caso de estudo de Vera (2016).

Do mesmo modo, a versatilidade desta aeronave permite a sua movimentação em todos os eixos possíveis, sendo eficaz na captura de imagens verticais simples e verticais oblíquas como é apresentado nos casos de estudo de Mader et al. (2016), Morgenthal e Hallermann (2015) e Reagan et al. (2018) na detecção de superfícies ou elementos específicos, constituindo assim, uma ferramenta útil para a inspeção visual da vedação vertical ou, como o caso de estudo de Irizarry e Costa (2016), uma ferramenta visual para o gerenciamento do canteiro de obra. Na Figura 1 é apresentado o resumo das principais vantagens e desvantagens dos veículos com asas fixas e rotatórias.

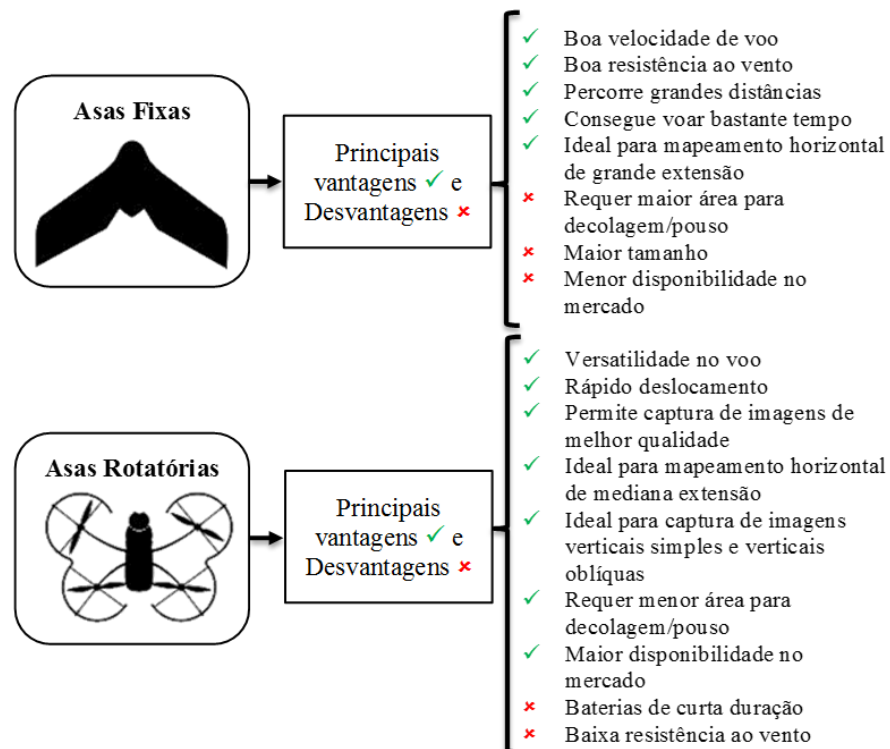


Figura 1. Vantagens e desvantagens do VANT em Função ao tipo de asas.

Segundo *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2017) qualquer aeronave destinada a voar sem um piloto a bordo é referida como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Os VANT de asas rotatórias usados nos estudos enquadram-se na classificação RPAS Classe 3 da ANAC, consequentemente tem restrições e requerimentos menores para os voos destas aeronaves, viabilizando seu uso em áreas urbanas e canteiros de obras (Brasil, 2017).

Do mesmo modo esses veículos comumente são simples de pilotar, a sustentação é dada pelo conjunto de motores controlados por um sistema eletrônico sofisticado que geralmente garante uma boa estabilidade da aeronave, que permite decolagem e pouso vertical. Portanto, são a opção principal para carregar câmeras e outros objetos sem grandes deslocamentos do ponto de decolagem. Na Figura 2 são apresentadas as características mínimas sugeridas para o equipamento com o intuito da inspeção visual de fachadas.

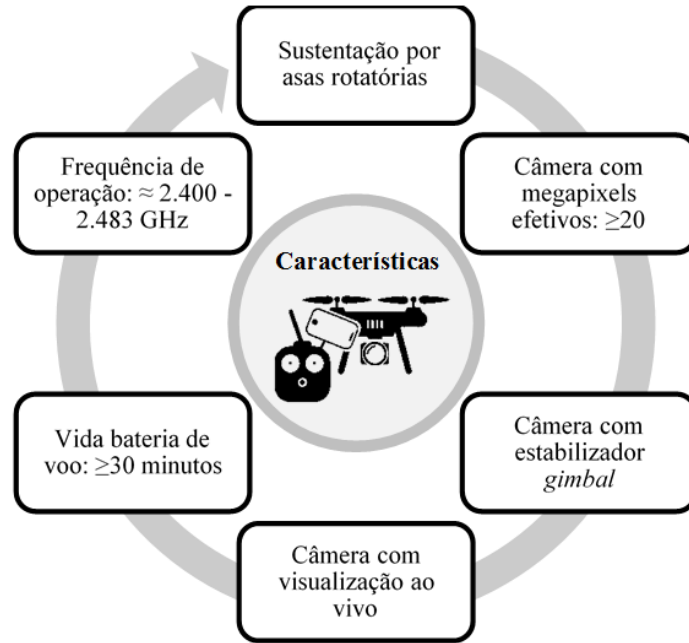


Figura 2. Características mínimas do equipamento para inspeção visual de fachadas.

Vale esclarecer que a facilidade de aquisição de um VANT atualmente não torna o usuário apto a pilotar o equipamento. Existem regras, normas e procedimentos para se tornar piloto de um Veículo Aéreo Não Tripulado (Aguilar, 2018), elas são especificadas nas RBAC-E nº 94. Resolução n. 419 (Brasil, 2017).

Nos últimos anos tem havido um aumento no uso de VANT para a inspeção de estruturas civis, especificamente edificações, devido ao seu longo alcance, aplicações de fotogrametria área, registro eficiente de dados, velocidade, segurança e redução de custos entre outros (Izarry e Costa, 2016; Shariq e Hughes, 2020; Groso et al., 2020). Na Figura 3 as vantagens reportadas do uso de VANT na revisão bibliográfica são comparadas a um dos métodos tradicionais mais utilizados, o alpinismo.

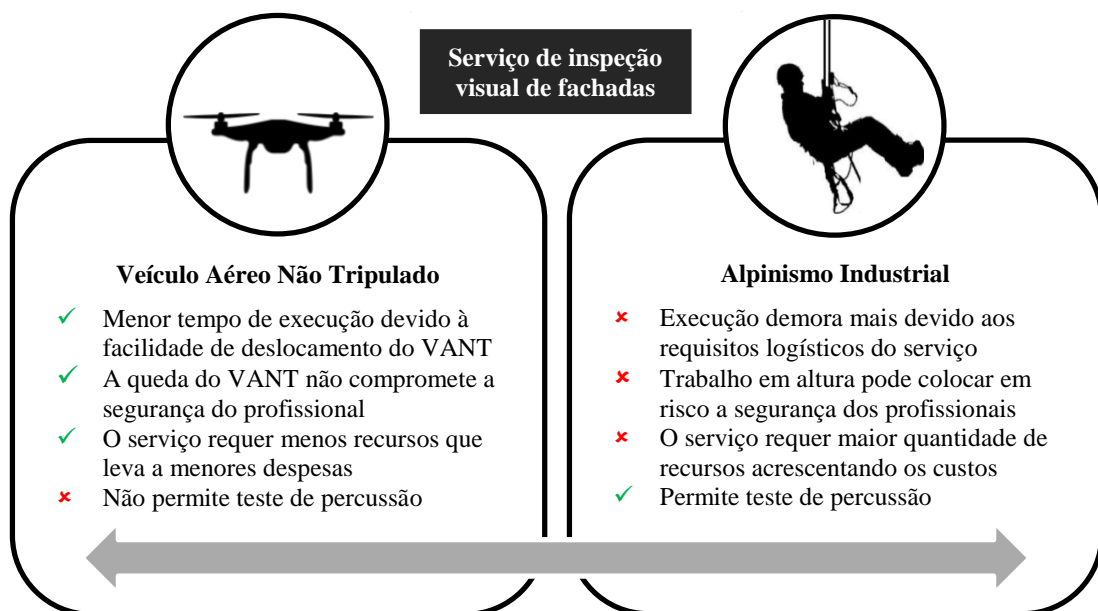


Figura 3. Comparação procedimentos de inspeção visual de fachadas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Baseando-se nas diretrizes inferidas da revisão bibliográfica e objetivando verificar a viabilidade do uso de VANT para inspeção de manifestações patológicas de fachadas, escolheu-se o Instituto de Inovação Tecnológica (IIT) da Universidade de Pernambuco. O prédio (Figura 4) do instituto possui quatro pavimentos e está localizado no PARQTEL (Parque Tecnológico de Eletroeletrônicos) de Pernambuco, no bairro de Curado (Figura 4). Esta edificação foi selecionada por suas características geométricas (múltiplas fachadas) e sua localização isolada em relação a outros edifícios na localidade, característica ideal para o treinamento e aperfeiçoamento dos voos com o VANT e o desenvolvimento dos protocolos de voo.

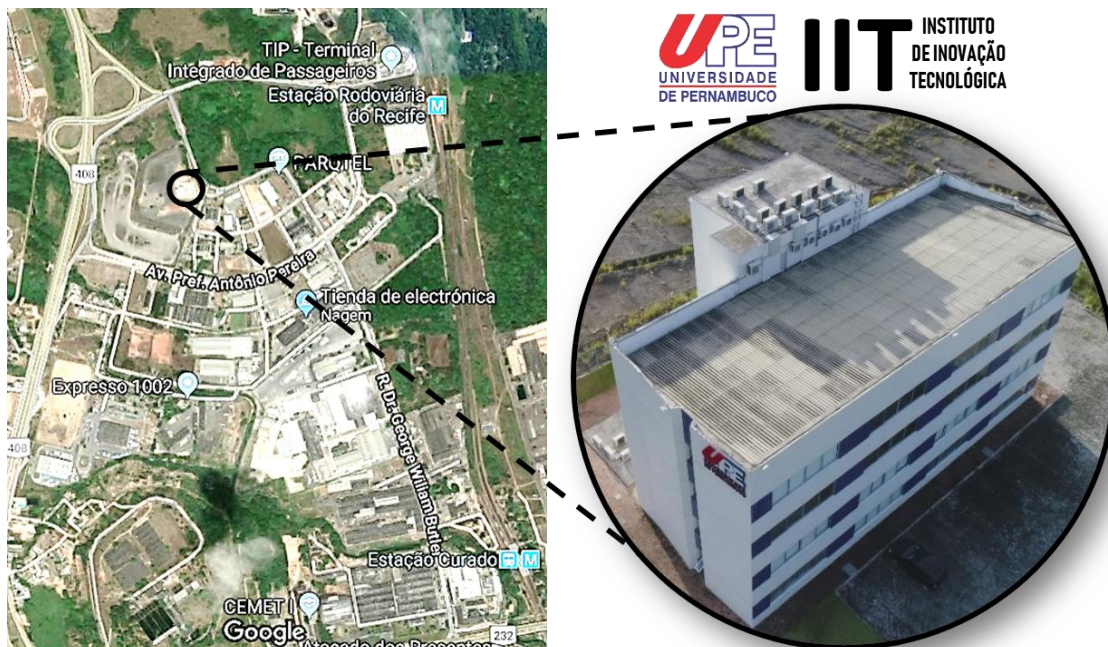


Figura 4. Instituto de Inovação Tecnológica da UPE. Adaptação de Google (2018).

Em seguida, foi realizado o treinamento no que diz respeito à operação do VANT, nesta fase foram realizados voos testes na edificação, com o objetivo de coletar dados e analisar os itens possíveis de serem visualizados através dos ativos visuais obtidos, a fim de refinar o método de coleta e os procedimentos técnicos necessários para que tal operação ocorra dentro dos critérios de segurança exigidos. Em resumo, esta etapa incluiu o treinamento da tecnologia, assim como a compreensão técnica do equipamento a ser usado.

Para a execução dos levantamentos de campo, utilizou-se o VANT modelo Phantom 4 Pro V2.0, fabricado pela DJI, equipado com câmera de 1" e 20 MP, sendo capaz de gravar vídeos em 4K 60 fps (fotos por segundo) e disparar no modo de disparo contínuo a 14 fps. Dirigido por um mando a distância com display HD de alta iluminação incorporado, além de possuir uma bateria de lítio que oferece 30 minutos de tempo de voo máximo. A Tabela 1 apresenta algumas características adicionais do Phantom 4 Pro V2.0.

Tabela 1. Características técnicas do Phantom 4 Pro V2.0

Especificações	Phantom 4 Pro V2.0
Peso (bateria e hélices incluídas)	1388 g
Tempo máximo de voo	30 min
Sistema de visão	Frente, trás e baixo
Detecção de obstáculos	Dianteiro e traseiro
	Infravermelho esquerdo e direito
Sistema de transmissão de vídeo	<i>Lightbridge</i>
Lente	FOV 84 ° 8,8 mm/24 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2,8 - f/11 foco automático a 1 m - ∞
Frequência de operação	2,4 GHz/5,8 GHz
	A transmissão de 5,8 GHz não está disponível em algumas regiones debido a las regulaciones locales

Fuente: DJI (2017)

A estratégia de captura de dados seguiu os conceitos básicos de fotogrametria digital, visando o paralelismo entre suas posições e a perpendicularidade ao plano do objeto de interesse, como demonstrado na Figura 5, e que cada parte do objeto fosse fotografada pelo menos em duas posições diferentes, garantindo a sobreposição das imagens (Groetelaars, 2015). Esses aspectos são importantes para maximizar os procedimentos referentes as correlações requeridas para a construção de ortomosaicos ou reconstruções tridimensionais.

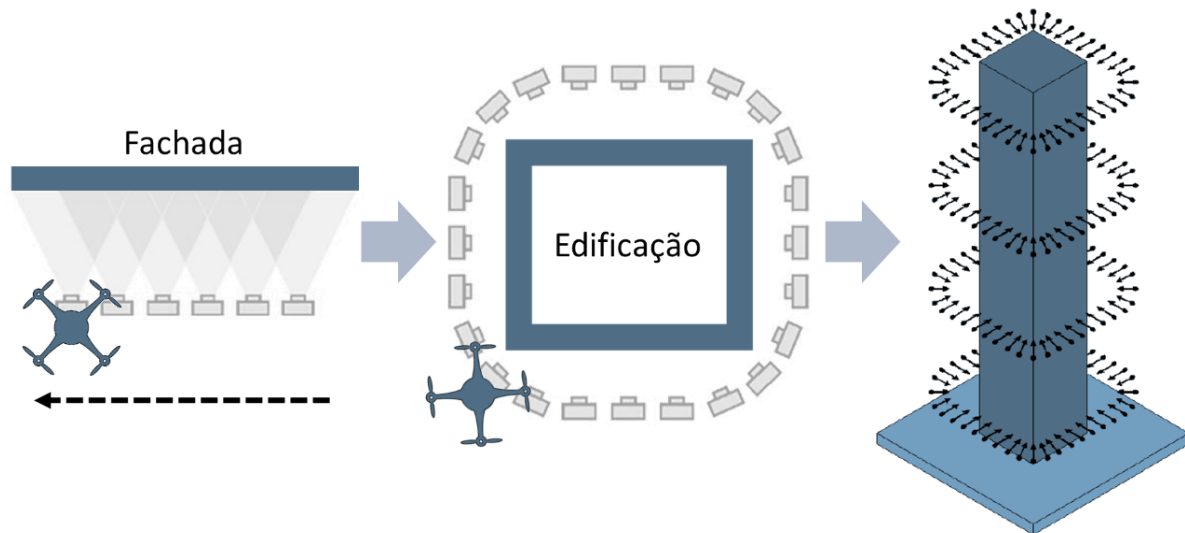


Figura 5. Estratégia para Captura de imagens. Adaptação de Melo Jr (2016).

No total foram realizados 8 voos experimentais em 4 testes de campo, já que é contabilizada a realização de um voo a cada decolagem e pouso realizados, inclusive para a troca de memória SD ou recarregar a bateria.

Os protocolos das atividades a realizar incluem o preenchimento do formulário para reunião de planejamento (padroniza a coleta de dados para elaboração do plano de voo, definindo os pontos de decolagem e pouso e indicando as áreas recobertas para modelagem 3D); e o checklist para missão com VANT (cadastro de dados técnicos do voo, além de checklist de todos os procedimentos necessários para operação do VANT em condições adequadas de segurança). Os testes foram iniciados em agosto de 2018, resultando em aproximadamente 2 horas e 30 minutos

de voo para treinamento, conforme apresentado na Tabela 2 na planilha *Flight Log* (relação de todos os dados físicos dos voos, registrados no aplicativo a ser adotado e no *Checklist* para missão). Dentre as informações registradas durante o voo por meio do App DJI Go, destacam-se, a quantidade de ativos visuais coletados (fotos e vídeos), distância, altitude máxima, duração de voo, sobreposição fotográfica e velocidade de voo.

Tabela 2. Dados de voos experimentais (Planilha *Flight Log*)

Nº	Hora	Número de fotos	Distância (m)	Altitude máxima (m)	Duração de voo (min)	Sobreposição fotográfica (%)	Velocidade de voo (km/h)
1	11:14	2	20	5	15	0	10
2	11:40	35	8	16	12	75	4
3	09:52	108	4	24	27	75	3
4	11:31	95	4	35	28	75	3
5	14:15	42	6	92	8	75	3
6	14:27	67	8	35	19	75	4
7	15:50	87	8	36	25	75	4
8	15:25	35	50	120	24	90	10

4. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a verificação da qualidade dos ativos visuais, evidencia-se que as fotos coletadas nos voos número 2, 6 e 7, apresentam uma excelente qualidade visual e ótima relação de distâncias, a 8 m de distância da fachada, e, conseqüentemente, a uma distância entre as estações de 1,8 m no sentido vertical e de 3,2 m no sentido horizontal.

Conforme Ballesteros (2020) e Pierrot-Deseilligny et al. (2011), essa relação entre a distância da posição das estações na tomada fotográfica e distância das estações para a fachada fotografada resulta ideal para a reconstrução 3D, visto que se essa relação for muito pequena, a correlação automática dos pontos é facilitada, mas a precisão geométrica na reconstrução digital da fachada é prejudicada.

Por conseguinte, as 189 fotografias coletadas a 8 m da fachada foram selecionadas para o processamento, as mesmas foram processadas utilizando a técnica *Stereo Matching*, sendo o processo de encontrar pontos correspondentes (*Smartmatches*) em duas ou mais imagens.

Assim, a reconstrução em 3D é possível desde que existam pelo menos 2 imagens da mesma cena, obtidas de posições diferentes (centros de projeções distintos) tal que, conhecendo a posição, a orientação e a distância focal, é possível encontrar a posição de um ponto no espaço a partir das coordenadas bidimensionais das imagens pelo princípio da geometria epipolar, conseguindo encontrar as relações geométricas entre os pontos 3D a partir de suas projeções nas as imagens 2D (Melo Jr., 2016).

Em outras palavras, os softwares de digitalização baseada em fotografias comparam pequenas áreas compostas por conjunto de Píxeis da imagem digital presentes em duas ou mais fotos que, por sua vez, são formadas pelas texturas ou marcas de contrastes da superfície do objeto ou cena. O processo de comparação segue-se até o programa encontrar as melhores correspondências entre as imagens. Quando as correspondências ótimas ou ideais são encontradas, a informação da posição e orientação já computada para as fotografias é usada para calcular a localização do ponto no espaço.

Para isso, o software de *Stereo Matching* selecionado para a reconstrução em 3D foi o *Agisoft*

PhotoScan. Esta etapa de pesquisa teve por objetivo a definição dos procedimentos e etapas necessárias para desenvolvimento adequado do mapeamento 3D e geração de ortomosaicos com uso do VANT. Por conseguinte, a correspondente sequência das etapas de processamento no *software Agisoft PhotoScan* e os parâmetros utilizados no processamento é descrita na Tabela 3.

Tabela 3. Fluxo de trabalho e parâmetros usados *Photo Scan Agisoft*.

Etapa	Parâmetros	
1.- Align Photos	<i>Accuracy:</i>	<i>Highest</i>
	<i>Pair preselection:</i>	<i>Generic</i>
	Nuvem Esparsa:	31.578
2.- Build Dense Cloud	<i>Quality:</i>	<i>High</i>
	<i>Depth filtering:</i>	<i>Aggressive</i>
	Nuvem densa:	22.767.991
3.- Build mesh	<i>Surface type:</i>	<i>Arbitrary 3D</i>
	<i>Face count:</i>	<i>High</i>
	Faces:	533.755
4.- Build texture	<i>Mapping mode:</i>	<i>Adaptive orthophoto</i>
	<i>Blending mode:</i>	<i>Mosaic</i>
5.- Build Orthomosaic	<i>Type</i>	<i>Planar</i>
	<i>Blending mode:</i>	<i>Mosaic</i>

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa do processamento consistiu no alinhamento das imagens (*Align Photos*), no qual o *Agisoft PhotoScan* busca semelhanças entre as imagens. O resultado final é a geração da nuvem de Tie Points ou pontos de amarração, ela é o produto básico para geração da nuvem de pontos densificadas, modelos 3D e ponto ligação entre as ortofotos no processo de mosaicagem e geração do mosaico de ortofotos.

Nesta etapa também foram inseridos os pontos de apoio coletados em campo utilizados para melhorar a precisão posicional da nuvem de pontos, seguido da eliminação dos pontos não desejados ou ruídos, como: as áreas de superfície mal capturadas, áreas pertencentes a outros objetos e pontos distantes. Obtendo como resultado final desta etapa o modelo apresentado na Figura 6, uma nuvem de pontos esparsa ou de baixa densidade, que também define a geometria da edificação.

Na segunda etapa foi construída a *Dense Cloud* ou nuvem densa de pontos 3D com a filtragem dos pontos não desejados ou ruídos. Assim, a partir das posições estimadas da câmera, o software calcula as informações de profundidade para cada câmera para serem combinadas num único ponto da nuvem densa.

Na configuração da densificação escolheu no nível mais alto, gerando mais de 22 milhões pontos. A principal função desta etapa é densificar a nuvem de pontos gerada no processo anterior, basicamente o software irá aumentar a quantidade de pontos na nuvem de pontos diminuindo os espaços vazios para representar melhor a área mapeada, o modelo gerado nesta etapa é apresentado na Figura 7, com a maioria dos detalhes geométricos da edificação reconstruídos digitalmente.

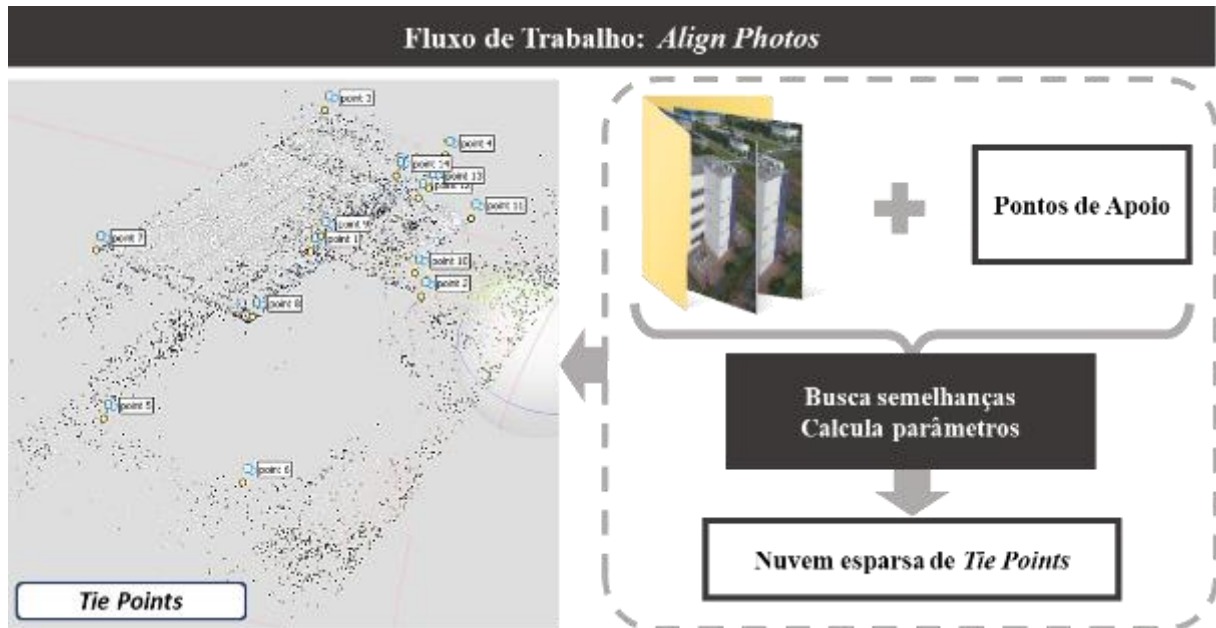


Figura 6. Nuvem de *Tie Points* IIT-UPE.

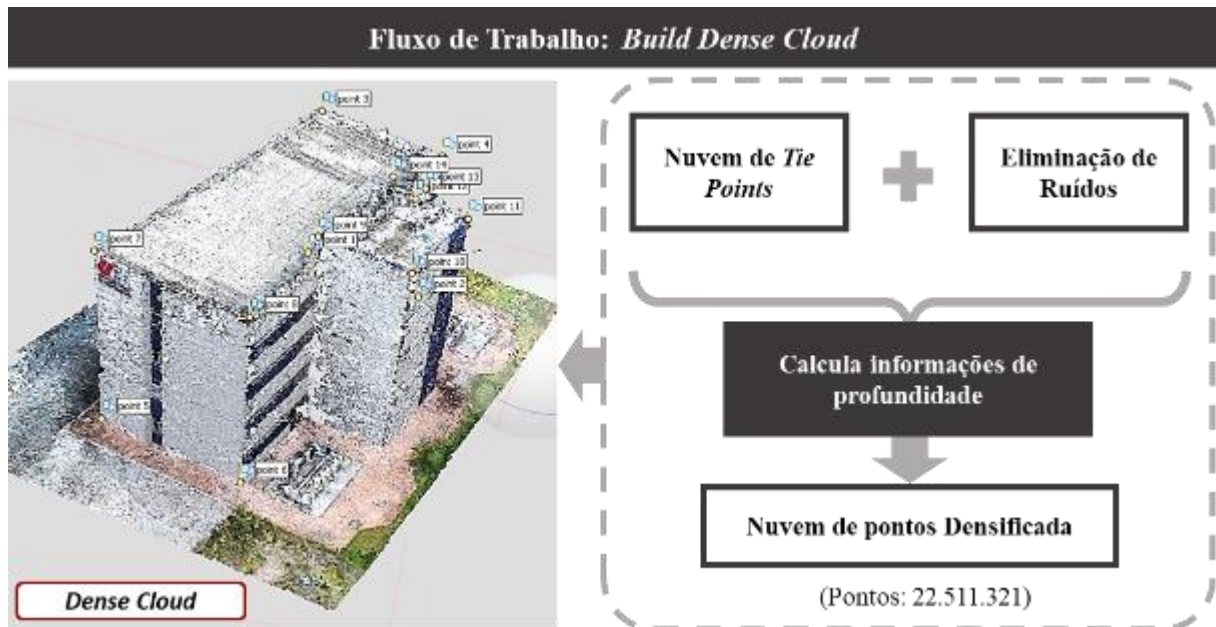


Figura 7. Nuvem de pontos Densificada IIT-UPE.

Na terceira etapa foi construída a *Mesh* ou malha, gerada a partir do agrupamento de vértices da nuvem densa de pontos. O modelo 3D gerado nesta etapa é apresentado na Figura 8, com mais de 500 mil faces ou polígonos adjacentes, compartilhando arestas da superfície de fronteira do objeto. Note-se que a quantidade necessária de faces para um modelo estará relacionada ao nível de detalhamento que se espera de um modelo e quanto maior esse nível, maior também será o custo computacional, ou seja, tempo necessário para processamento e, enfim, o desempenho requerido do hardware. Se o modelo for gerado a partir da nuvem de pontos esparsa, naturalmente a quantidade de faces e vértices reduzirá.

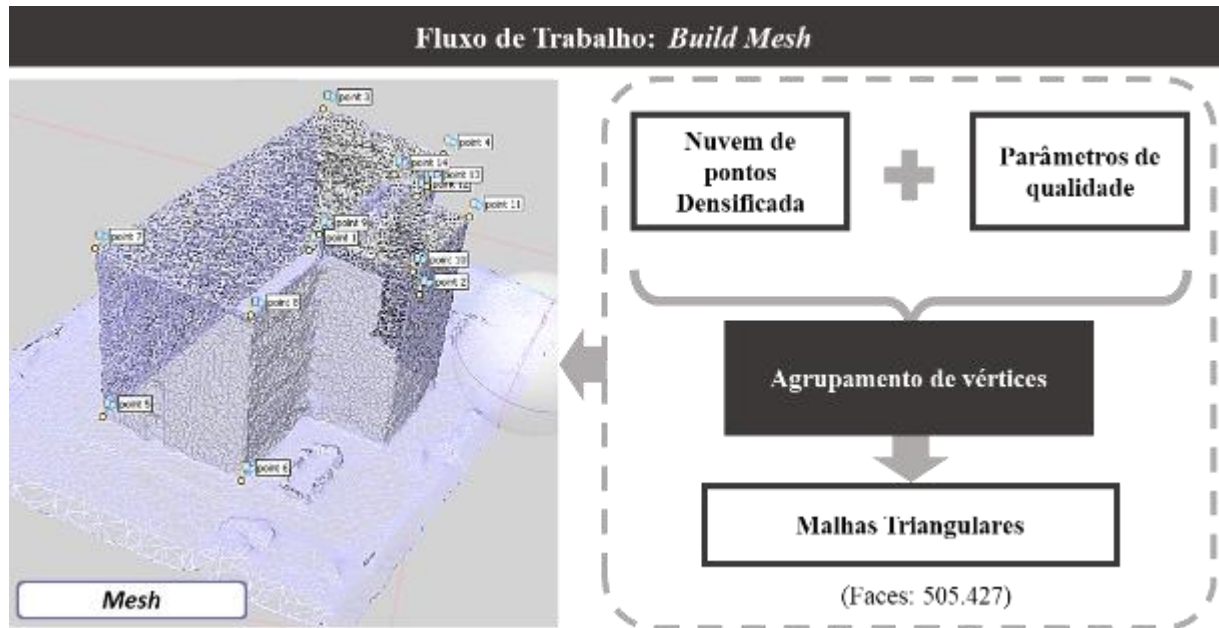


Figura 8. Modelo de Malhas Triangulares IIT-UPE.

Na quinta e última etapa, para gerar o ortomosaico inicialmente foi realizado o processo de ortoretificação das imagens, onde as feições das imagens são projetadas ortogonalmente, com escala constante, não apresentando os deslocamentos devidos ao relevo e à inclinação da câmera. Com as imagens devidamente corrigidas o software realiza a mosaicagem das ortofotos e cria um único produto.

Na quarta etapa, o objetivo é somente aplicar uma textura no modelo tridimensional para melhorar o aspecto visual do modelo, com o intuito de permitir a visualização de patologias na fachada. O modelo 3D texturizado gerado nesta etapa é apresentado na Figura 9.

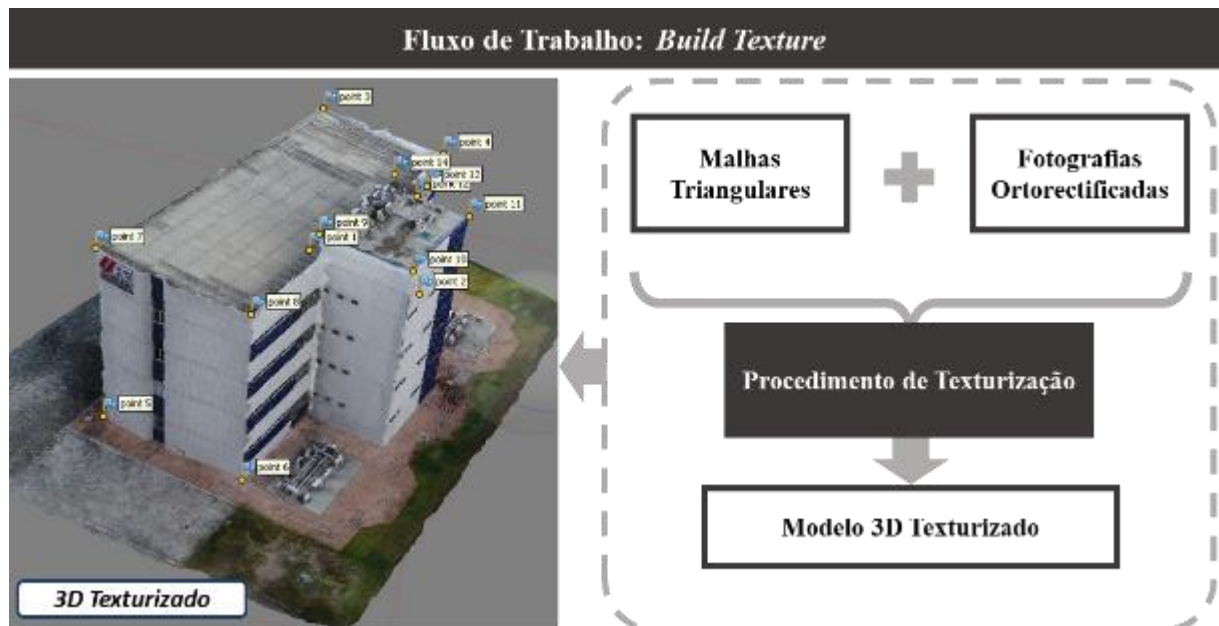


Figura 9. Modelo Texturizado IIT-UPE.

O software *Agisoft PhotoScan* permite que ortomosaicos sejam exportados a partir dos modelos gerados anteriormente. Para exemplificar, a Figura 10 apresenta o ortomosaico correspondente à fachada Sul da edificação IIT.



Figura 10. Modelo Ortomosaico da Fachada Sul IIT-UPE.

O produto final do processamento proporcionou o modelo digital 3D mostrado na Figura 11, com resultado satisfatório em termos da sua reconstrução geométrica, ele é exportável em vários formatos para seus diversos usos, de acordo com a aplicação que se deseja.

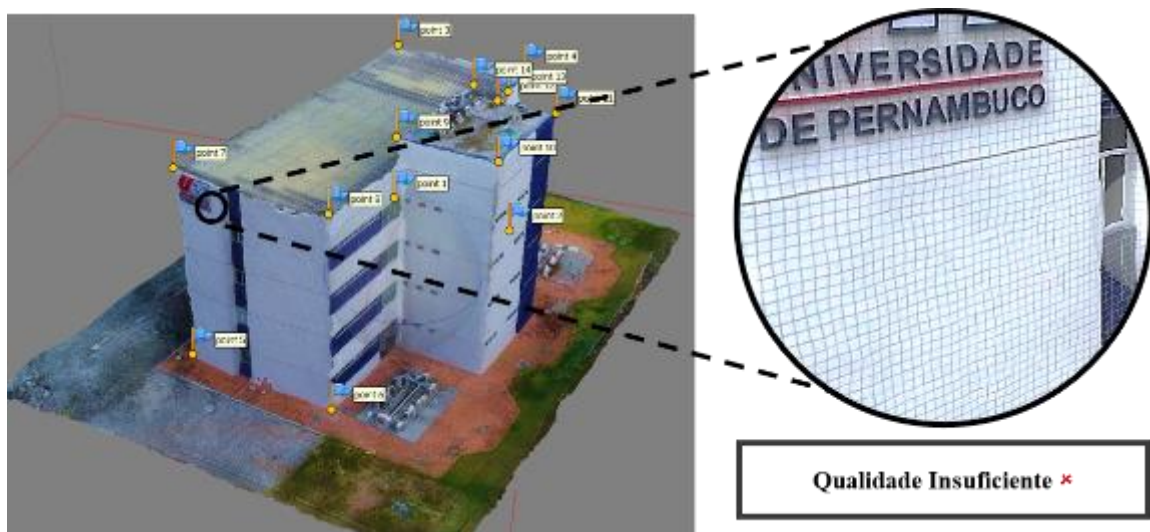


Figura 11. Produto final Modelo 3D Texturizado IIT-UPE

Entretanto, a qualidade deste modelo é insuficiente para o intuito da detecção de patologias nas fachadas, isto devido a que o modelo apresenta distorções nas fachadas texturizadas. Autores como Roca et al. (2018) e Rakha e Gorodetsky (2018) também geraram modelos 3D em seus respectivos estudos, destacando algumas limitações. Rodriguez-Gonzalvez et al. (2014) também apontam que a reconstrução 3D possui limitações quanto à qualidade e integridade da estrutura inspecionada.

Para um resultado mais criterioso foram criados os ortomosaicos de cada fachada da edificação. Essas imagens ortorectificadas atingem a qualidade suficiente para o procedimento de detecção de manifestações patológicas por inspeção visual.

Isto é demonstrado na Figura 12, na qual o ortomosaico da fachada sul permitiu o descobrimento de fissuração no revestimento cerâmico, início de eflorescência na fachada e, patologias decorrentes de processos biológicos (Mofo e Bolor).

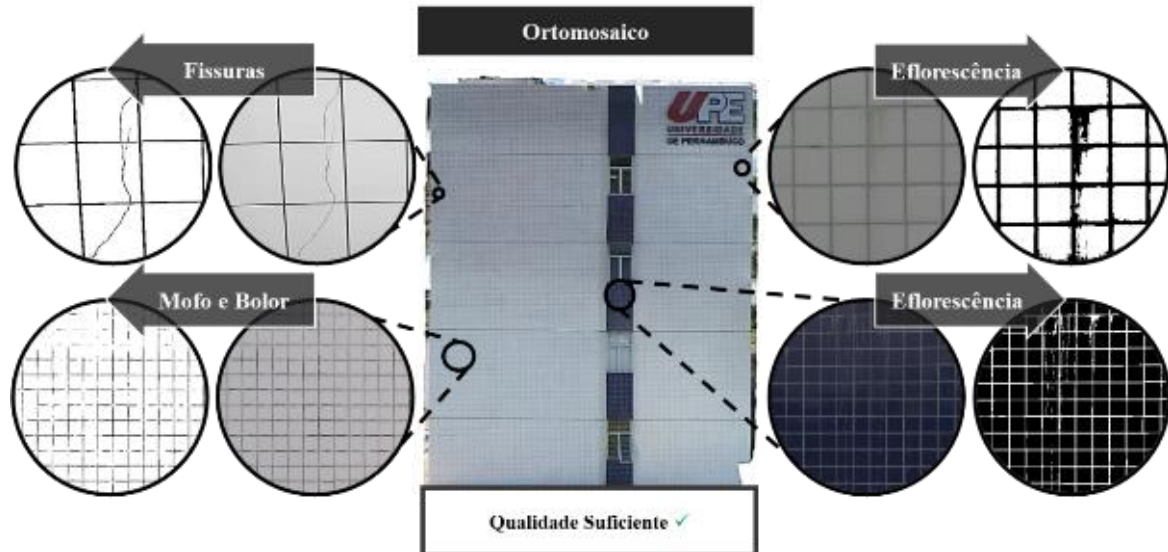


Figura 12. Detecção Manifestações Patológicas da Fachada Sul IIT-UPE.

Por fim, após a elaboração da revisão bibliográfica e o desenvolvimento do estudo experimental, percebeu-se a viabilidade do uso de VANT para o serviço de detecção de manifestações patológicas em fachadas, como também foi reportado na pesquisa de Tondelo e Barth (2019).

A utilização de VANT para inspeção de fachadas apresenta-se como uma alternativa ao método tradicional, fornecendo as informações necessárias para o diagnóstico da estrutura. Os resultados são obtidos quando é disponibilizado um VANT com multirrotor e uma câmera HD, conforme utilizado na presente pesquisa e apontado por Falorca e Laninha (2020).

Embora o presente estudo tenha se limitado ao uso de VANT como ferramenta visual para a inspeção de manifestações patológicas de fachadas; no entanto, o uso de diferentes técnicas, como técnicas de aprendizagem profundo (*deep learning*) podem ser combinadas para auxiliar e automatizar a inspeção visual, conforme proposto por Ruiz et al. (2021).

Observa-se a necessidade da criação de um procedimento que permita estruturar passo a passo a técnica para o serviço de inspeção visual de fachadas com uso desta tecnologia. O procedimento abrangeria um protocolo de voo adequado para esses fins além de idealizar as etapas de captura, armazenamento, processamento e post processamento de dados. Por conseguinte, conseguiria-se garantir as vantagens vislumbradas deste procedimento em relação ao modelo tradicional de inspeção, que inclui alpinismo industrial.

6. CONCLUSÕES

Após a elaboração deste estudo, percebeu-se a importância da escolha correta do VANT para as diferentes funções que ele pode cumprir, eles apresentam grandes vantagens e desvantagens de acordo às diferentes características de desenho, principalmente em função do tipo de sustentação: por asas rotatórias ou asas fixas. Para o caso específico de inspeção visual de fachadas, como já foi abordado, são ideais os veículos com asas rotatórias, gimbal e câmera aérea, permitindo agilidade e qualidade na filmagem e captura de imagens em alta resolução (*high definition* - HD) dos diferentes pontos da vedação vertical ou elemento da análise. Assim, esse procedimento acurado pode expor problemas não observados a olho nu visto do térreo, como por exemplo: infiltrações, descolamento, mofo, bolor, trincas e fissuras no revestimento.

O conveniente enquadramento deste tipo de VANT na legislação brasileira e suas restrições menores, permitem a comercialização em maior escala e geralmente a menor preço que seus pares de asas fixas, consequentemente sendo mais acessíveis ao público. Também é recomendado verificar que o veículo cumpre as características mínimas antes discutidas. Na atualidade o VANT comercial ainda tem limitações técnicas, principalmente na duração da bateria e capacidade de carga, porém observa-se que as perspectivas futuras apontam ao desenvolvimento contínuo desta tecnologia, mitigando assim ditas limitações e ampliando o cenário desta tecnologia dentro da indústria da construção civil.

De acordo com o procedimento experimental e os resultados preliminares, cabe destacar que o *software Agisoft PhotoScan* permite uma ampla faixa de operação quanto à qualidade do resultado, desde resultados de baixa resolução a resultados altamente elaborados, com um custo computacional crescente neste sentido.

No que diz respeito à análise da qualidade dos mapeamentos 3D desenvolvidos, em adequação à utilização proposta, com base nos resultados obtidos é possível afirmar que a qualidade dos modelos 3D texturizados ainda não atingem a qualidade suficiente para o intuito de detecção de patologias nas fachadas, embora seu uso ainda não tenha sido descartado, a partir do preceito que essa qualidade pode ser melhorada com câmeras mais potentes e procedimentos de captura de imagem mais treinados. Por outro lado, os ortomosaicos gerados a partir destes modelos, têm a qualidade requerida para a inspeção visual. Enfim, os ativos visuais obtidos apontam que ambos podem ser adequados para a utilização proposta, apresentando resultados gerais satisfatórios.

Há evidências suficientes que enfatizam as diferentes vantagens do uso deste veículo como ferramenta eficiente e flexível para a inspeção na indústria da construção civil. Enfim, essas vantagens permitem um serviço com maior segurança, maior velocidade e custos mais baixos, exigindo menos recursos comparado com método tradicional de alpinismo industrial. Assim, com o desenvolvimento cada vez maior desta tecnologia, aliada a outros tipos de câmeras e sensores, permite o acesso a locais antes inacessíveis ao ser humano e a outras tecnologias, vislumbrando seu uso não apenas na inspeção visual de fachadas, mas também em outras áreas da construção civil.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out with the support of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil - (CAPES) - Financing Code 001.


8. REFERÊNCIAS

- Agostinho, S. L. (2012), “*Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil – Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização*”, Masther’s Thesis, Universidade da Madeira, p. 105.
- Álvares, J., Costa, D. B., Melo, R. R. S., Bello, A. (2016). “*Estudo exploratório de mapeamento 3D de canteiros de obras utilizando veículos aéreos não tripulados*” in: VI ENTAC, São Paulo: São Paulo (Brasil).
- Ballesteros, R. (2020), “*Inspeção de manifestações patológicas de fachadas utilizando Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): estudo exploratório*”, Masther’s Thesis, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, p. 220.
- Brasil. Agência Nacional de Aviação Civil. Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil - RBAC-E nº 94. Resolução n. 419, 2 de maio de 2017. Brasília, 2017.
- De Melo, R., Costa, D., Álvares, J., Irizarry, J. (2017), *Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites*. Safety Science. 98:174-185. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.008>
- DJI (2017). Phantom 4 Pro Homepage. Recuperado em 26 de setembro de 2020 de https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_EN.pdf
- Emelianov, S., Bulgakow, A., Sayfeddine, D. (2014). “Aerial laser inspection of buildings facades using quadrotor” in: Creative Construction Conference, Prague (Czech Republic).
- EXAME. Revista Online Grupo Abril. (2016). Recuperado em 26 de setembro de 2020 de <https://www.exame.abril.com.br>
- Falorca, J. F., Lanzinha, J. C. G. (2020). *Facade inspections with drones—theoretical analysis and exploratory tests*. International Journal of Building Pathology and Adaptation, ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-07-2019-0063>
- Flores-Colen, I., De Brito, J., De Freitas, V. (2018). *Stains in facades’ rendering – Diagnosis and maintenance techniques’ classification*. Construction and Building Materials. 22(3):211-221. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.023>
- Groetelaars, N. J. (2015), “*Criação de modelos BIM a partir de nuvens de pontos: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica*”, Doctoral Dissertation, Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, Brasil.
- Grosso, R., Mecca, U., Moglia, G., Prizzon, F., Rebaudengo, M. (2020). *Collecting Built Environment Information Using UAVs: Time and Applicability in Building Inspection Activities*. Sustainability. 12:4731. <https://doi.org/10.3390/su12114731>
- Hung, M. N. W. B., Sampaio, T. V. M., Schultz, G. B., Siefert, C. A. C., Lange, D. R., Marangon, F. H. S., Santos, I. (2018). *Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa*. Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise. 43:215-231. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v43i0.56621>
- ICAO - International Civil Aviation Organization. (2017). Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) concept of operations for international IFR operations. ICAO (USA), p. 30.
- Irizarry, J., Costa, D.B. (2016). *Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks*. Journal of Management in Engineering. 32(3):1-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422)
- Kim, S., Irizarry, J., Costa, D. B., Mendes, A. T. C. (2016). “*Lessons learned from unmanned aerial system-based 3D mapping experiments*” in: 52nd ASC Anual International Conference, Provo: Utah (USA).

- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gotzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P., Kleijnen, J., Moher, D. (2009). *The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration*. BMJ, 339:b2700–b2700. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>
- Mader, D., Blaskow, R., Westfeld, P., Weller, C. (2016). *Potential of UAV-Based laser scanner and multispectral camera data in building inspection*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B1:1135-1142. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-1135-2016>
- Máthé, K., Buşoniu, L. (2015). *Vision and Control for UAVs: A Survey of General Methods and of Inexpensive Platforms for Infrastructure Inspection*. Sensors. 15(7):14887-14916. <https://doi.org/10.3390/s150714887>
- Melo Jr., C. M. (2016), “*Methodology for generating façade damage maps from unmanned aerial vehicle photographs and digital image processing*”, Doctoral Dissertation, Universidade de Brasília, Brasil.
- Melo, R. R. S., Costa, D. B. (2015). “*Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para inspeção de logística em canteiros de obra*” in: SIBRAGEC-ELAGEC, São Carlos: São Paulo (Brasil).
- Morgenthal, G., Hallermann, N. (2014). *Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures*. Advances in Structural Engineering. 17(3):289-302. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.3.289>
- Nascimento, M. L. M. (2017), “*Utilização de drone e termografia na detecção de manifestações patológicas em edificações*”, Monograph, Universidade Católica de Brasília, p. 21.
- Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C., Siegwart, R. (2013). “*A UAV system for inspection of industrial facilities*” in: 2013 IEEE Aerospace Conference, Big Sky: Montana (USA). <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496959>
- Pacheco, C., Vieira, G. (2017). “*Metodologias para Inspeções de Fachadas de Edifícios*” in: IV CIRMARE - Congresso Internacional na Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios, São Paulo: São Paulo (Brasil).
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., Remondino, F. (2011). *Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation*. Geoinformatics CTU FCE. 6:291-299. <https://doi.org/10.14311/gi.6.36>
- Piórkowski, D. T. (2008). “*Rectification and Intermediate View synthesis*”, Monograph, Universitat Politècnica de Catalunya, p. 47.
- Pires, R., De Brito, J., Amaro, B. (2015). *Inspection, Diagnosis, and Rehabilitation System of Painted Rendered Façades*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 29(2):1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000534)
- Rakha, T., Gorodetsky, A. (2018). *Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones*. Automation in Construction. 93:252–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>
- Reagan, D., Sabato, A., Niezrecki, C. (2018). Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. Structural Health Monitoring. 17(5):1056-1072. <https://doi.org/10.1177/1475921717735326>
- Roca, R., Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Armesto, J., Arias, P. (2013). *Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades*. Automation in Construction. 36:128-135. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.020>
- Rodríguez-Gonzálvez, P., González-Aguilera, D., López-Jiménez, G., Picon-Cabrera, I. (2014). *Image-based modeling of built environment from an unmanned aerial system*. Automation in Construction. 48:44-52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.08.010>

- Ruiz, R. D. B., Lordsleem Júnior, A. C., Fernandes, B. J. T., Oliveira, S. C. (2021). Unmanned Aerial Vehicles and Digital Image Processing with Deep Learning for the Detection of Pathological Manifestations on Facades. In: Toledo Santos E., Scheer S. (eds) Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. ICCCBE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 98. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_76
- Shariq, M. H., Hughes, B. R. (2020). *Revolutionising building inspection techniques to meet large-scale energy demands: A review of the state-of-the-art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 130:109979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109979>
- Tondelo, P. G., Barth, F. (2019). *Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT*. PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção, 10, e019009. <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652817>
- Vera-Rozo, E. (2016). *Medición de contaminación mediante UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado)*. Mundo FESC. 6(11): 16-26.
- Yang, X., Qin, X., Wang, J., Wang, J., Ye, X., Qin, Q. (2015). *Building Façade Recognition Using Oblique Aerial Images*. Remote Sensing. 8(7): 10562-10588. <https://doi.org/10.3390/rs70810562>

Avanços na instrumentação de estruturas com fibra ótica. O presente de uma instrumentação com futuro

V. Alegre^{1*}, S. Villalba² 

* Autor de Contato: info@cotca.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.485>

Recepção: 14/11/2019 | Aceitação: 30/10/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

É discutido o exemplo de um caso real em que, em um túnel existente, um edifício é construído com instrumentação de fibra ótica que permite monitorar o histórico de carregamento de uma estrutura desde sua instalação. Para verificar se o túnel não é estruturalmente afetado durante o período de construção, trechos do túnel são instrumentados e as microdeformações ocorridas são medidas, as quais são comparadas com as do modelo. Foi possível apreciar as ovalizações e tensões na abóbada durante as diferentes fases do processo de construção, estando todas abaixo dos valores limites estabelecidos no plano de contingência. Esta técnica permitiu validar os trabalhos realizados ao longo do processo.

Palavras-chave: fibra ótica; instrumentação; túneis; microdeformações.

Citar como: Alegre, V., Villalba, S. (2021), "Avanços na instrumentação de estruturas com fibra ótica. O presente de uma instrumentação com futuro", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 105 – 122, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

¹ COTCA, S.A., Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, Barcelona, España.

² COTCA, S.A., Profesor Asociado Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción, UPC, Barcelona, España.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor V. Alegre contribuiu para a gestão da persuasão das vantagens deste tipo de aplicações, e no processo de implementação no local de fibra ótica, definição da área ideal de acordo com as posições do edifício e do túnel, e comissionamento. O autor S. Villalba desenvolveu o modelo utilizado para a interpretação dos resultados, realizou o plano de leitura previsto de acordo com as fases de construção e analisou e interpretou os resultados obtidos e as suas conclusões ao longo do processo de construção.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Advances in the implementation of optical fiber on structures. The present of an implementation with a future

ABSTRACT

An example of a real case is discussed in which, on an existing tunnel, which is instrumented with optical fiber, a building is built. This makes possible to track the load history of a structure since the fiber is placed. To verify that the tunnel is not structurally affected during the construction period, sections of it are instrumented and the micro deformations that occur are measured, which are compared with those of the model. It has been possible to appreciate the ovalizations and tensions in the vault during the different phases of the construction process, all of them being below the limit values established in the contingency plan. This technique has made possible to validate the works carried out throughout the process.

Keywords: optical fiber, instrumentation, tunnels, microdeformations

Avances en la instrumentación de estructuras con fibra óptica. El presente de una instrumentación con futuro

RESUMEN

Se discute el ejemplo de un caso real en el que, sobre un túnel existente, se construye un edificio con instrumentación de fibra óptica que permite hacer el seguimiento de la historia de cargas de una estructura desde su instalación. Para constatar que no se ve afectado estructuralmente el túnel durante el período de construcción, se instrumentan secciones de este y se miden las microdeformaciones que se producen, que se comparan con las del modelo. Se han podido apreciar las ovalizaciones y tensiones en la bóveda durante las distintas fases del proceso constructivo, estando todas ellas por debajo de los valores límites establecidos en el plan de contingencias. Esta técnica ha permitido validar durante todo el proceso las obras realizadas.

Palabras clave: fibra óptica; instrumentación; túneles; microdeformaciones.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

Um problema técnico frequente é a interação entre os novos canteiros de obras e a infraestrutura existente. As diferentes partes de uma infra-estrutura são geridas para uma determinada vida útil, como é o caso da Rede do Metrô de Barcelona, cujo estado atual foi definido de forma ordenada entre 2000 e 2003 deixando, entre outros documentos, um túnel virtual de 92km a partir daí, com a geometria da seção transversal e a lista de danos e disfunções para a sua gestão. Os primeiros quilômetros do túnel datam de 1924 e, logicamente, a administração responsável (Generalitat de Catalunya) e a entidade que o gere (Transports de Barcelona, SA) obrigam que os novos edifícios construídos dentro da área de influência das suas infra-estruturas sejam verificados se eles não afetam o uso e o serviço da rede, ou sua estrutura. Para isso, entre outras coisas, exige que a área afetada seja avaliada estruturalmente, fornecendo as informações estruturais disponíveis, e que sejam registrados os movimentos que ocorrerem na infraestrutura durante a construção da nova obra, agindo de acordo.

Para fazer isso, às vezes as medições são feitas com teodolitos monitorados em vários pontos da seção transversal. Se se deseja mais precisão para avaliar os riscos, uma ferramenta muito válida é a tecnologia da fibra óptica que, aderida à superfície, permite medir microdeformações, por exemplo, nas seções transversais centímetro a centímetro.

Essa tecnologia consiste na utilização de um refletômetro óptico de retroespalhamento denominado sistema OBR (Optical Backscatter Reflectometer) como ferramenta de monitoramento, neste caso, de uma estrutura de concreto armado de um túnel com segmentos da Linha 9 em Barcelona, que poderia apresentar fissuras ou disfunções em serviço, em consequência da construção de um edifício parcialmente efetuada na referida seção do túnel.

A principal característica do sistema OBR é sua grande sensibilidade e alta resolução espacial através do uso de fibra óptica como sensor. Isso produz registros de deformação nos quais a presença de fissuras pode ser identificada e localizada.

Ao longo deste túnel será construído um edifício, estando todo o processo modelado: fundação, laje de fundação, execução da estrutura e carregamento de todos os subsistemas que integram o edifício (fachadas, pavimentos, divisórias, instalações, ...).

Para essas etapas de carregamento, são estabelecidos os valores esperados, e é criado um plano de contingência com avisos, alertas e alarmes caso sejam ultrapassados. À medida que o trabalho avança, a instrumentação efetuada no túnel com a fibra óptica registra os valores obtidos de forma contínua ou semicontínua, o que nos permite conhecer a todo o momento as possíveis disfunções que ocorrem na seção (ovalizações, microdeformações, novas fissuras, etc.) e agir em conformidade. O prazo previsto para a execução da obra é de 18 meses, uma vez terminada a obra, poderá ser mantida a instrumentação e efetuadas leituras quando, por exemplo, ocorrerem incidentes e pretende-se avaliar o seu impacto na estrutura do túnel a partir do qual se encontra seu "histórico de carregamento".

A fibra óptica, que como sistema de monitoramento contínuo é resistente à água e à corrosão, evita problemas de interferência eletromagnética e correntes parasitas que ocorrem em outras técnicas, e permite leituras simultâneas de até 5.000 pontos da estrutura em estudo.

O objetivo deste trabalho é verificar se um túnel não é estruturalmente afetado durante o período de construção de um edifício, por meio da instrumentação de trechos do primeiro em que são medidas as microdeformações que ocorrem, e comparadas com o do modelo. Desta forma, as ovalizações e tensões na abóbada podem ser apreciadas durante as diferentes fases do processo de construção.

2. MODELAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO TÚNEL

A modelagem das diferentes etapas foi realizada com o programa SAP2000 e o PLAXIS bidimensional, e apresentou, com base na geometria definida na Figura 1, os seguintes resultados indicados na Tabela 1 e Figura 2:

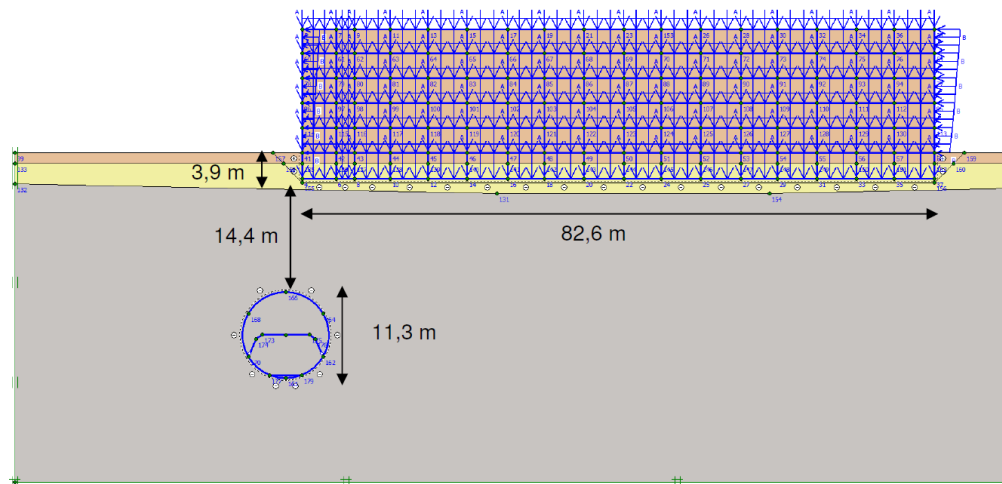


Figura 1. Geometria da seção de cálculo.

Tabela 1. Resultados obtidos no modelo.

	Na situação atual	Fase de escavação de estacionamento	Fase de uso do edifício
Esforços no revestimento do túnel			
Nk (kN/m)	1.430	1.410	1.700
Vk (kN/m)	39,63	38,44	45,04
Mk (kN·m/m)	33,45	34,10	61,66
Deslocamentos máximos no túnel			
Horizontal (mm)	0 (*)	1,49	-2,98
Vertical (mm)	0 (*)	1,63	-7,18

(*) A situação atual é adotada como situação de referência, ou seja, estado de deformação 0.

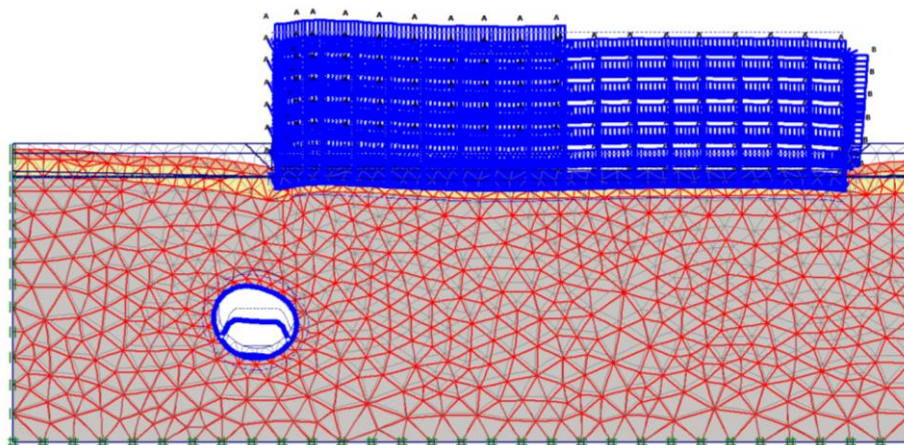


Figura 2. Primeiro mecanismo de falha encontrado, para um fator de segurança de 2,29.

Como consequência do exposto, foi estabelecido um plano de contingência, o qual está resumido na Tabela 2:

Tabela 2. Tensões máximas e deformações nos segmentos. Plano de contingência.

	Valores das zonas de compressão		Valores da zona de tração
	Aduelas		Aduelas
	$\Delta\sigma$ (Mpa)	$\Delta\mu\epsilon$	abertura de fissura $\Delta\delta$ (mm)
Aviso	18.40	755	0.50
Alerta	28.40	955	1.80
Alarme	33.40	1595	3.50

O túnel instrumentado L9 é uma seção típica com faixas sobrepostas e laje intermediária. A fibra óptica foi colocada no perímetro da seção transversal, sempre de acordo com a Propriedade. A Figura 3 mostra seu posicionamento. A colocação das fibras foi realizada seguindo o perímetro de uma seção transversal na posição indicada no plano.

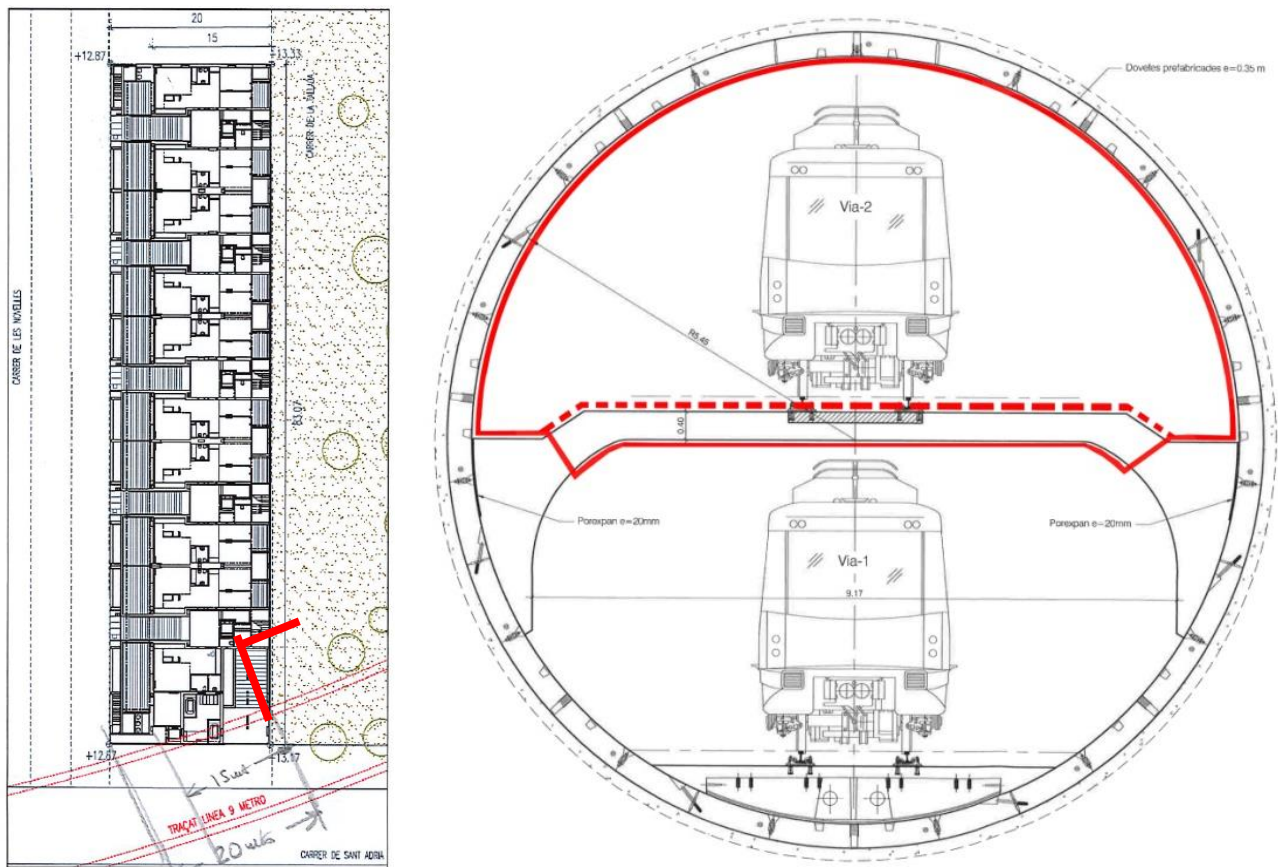


Figura 3. Planta detalhada do prédio em relação ao túnel do metrô e trecho da rota de fibra óptica.

A instrumentação proposta mede microdeformações na seção transversal do túnel, ou seja, os possíveis movimentos ou disfunções da seção transversal.

Na leitura zero inicial com a fibra óptica, é feita uma lista das disfunções atuais (fissuras, umidade, fissuras, rugosidade anormal, etc.) A Figura 4, a Figura 5 e a Figura 6 mostram algumas das disfunções detectadas na coleta inicial de dados.



Figura 4. Juntas na laje da via, existentes a cada 25m.



Figura 5. Vazamento (lixiviação da cal do cimento).



Figura 6. Rugosidade e parafusos de fixação que podem afetar a colocação da fibra.

Em cada leitura posterior colocadas nas diferentes fases da obra (antes do início, esvaziamento, acabamento da fundação, estrutura e final da obra), são medidas as microdeformações nos perímetros das seções transversais, comparadas com o modelo executado e emitido relatórios. Quando os critérios de ovalização prescritos nos regulamentos forem ultrapassados ou forem detectados defeitos, as ações serão tomadas de acordo com o protocolo do plano de contingência estabelecido.

Isto permite detectar as principais alterações no comportamento estrutural do túnel e obter informações que servirão para avaliar a sua segurança estrutural, durante a construção do edifício, no final das obras e ao longo da sua vida útil.

2.1 Esquemas de posicionamento

Todo o sistema de monitoramento foi localizado na zona estratégica suscetível à possível dinâmica e evolução da resposta estrutural (variações de microdeformações-tensões, movimentos, possíveis aumentos e/ou desenvolvimento de mapas de fissuras, etc.) do túnel ao longo da obra de construção civil. Este sistema de instrumentação foi selecionado considerando as condições de trabalho a que estará submetido (variação térmica, condições de uso, etc.).

O escopo do monitoramento usado é mostrado abaixo (ver Figura 7).

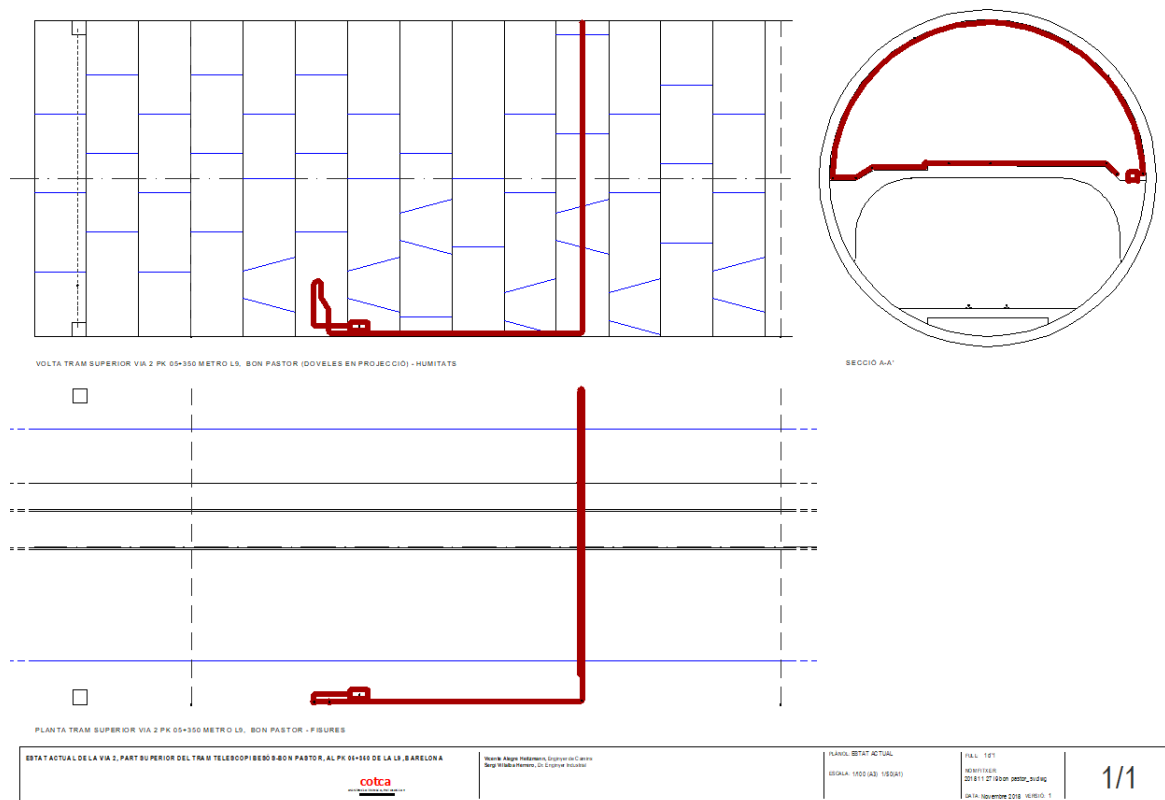


Figura 7. Esquema geral do túnel. Elevação e planta. A linha vermelha indica o caminho da fibra óptica.

O comprimento real de monitoramento do túnel é ajustado ao comprimento real de uma seção transversal e de uma seção longitudinal, sendo esta uma distância de 50,00m de comprimento. Ou seja, a fibra óptica FOD1 (Fibra Óptica Distribuída) é fixada 40m e os últimos 10m foram mantidos na bobina contendo a fibra óptica (não fixada), que foi fixada na estrutura com fita adesiva. Este detalhe pode ser visto na Figura 8, Figura 9 e Figura 10, juntamente com o sistema instalado dentro da seção transversal do túnel.



Figura 8. Carretel de fibra ótica restante sujeito à estrutura e ODiSI (Optical Distributed Sensor Interrogator, da LUNA Technologies, Modelo A50) em operação.



Figura 9. Vista geral do túnel na seção instrumentada.



Figura 10. Fibra ótica protegida sob os trilhos do trem.

A Figura 11 mostra o procedimento de aderência realizado com a fibra ótica na laje da via 2 e na abóbada do túnel.



Figura 11. Procedimento de aderência de fibra ótica na laje da via 2 e na abóbada do túnel.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.

3.1 Resultados do modelo

As tensões e deslocamentos no túnel foram obtidos antes, durante e após a construção do edifício por meio de um método de cálculo de elementos finitos na hipótese de deformação plana. O programa de computador usado é o PLAXIS v8.

Os resultados mais significativos obtidos com o monitoramento proposto são detalhados a seguir. A Figura 12 mostra a seção seccional do túnel com a tramificação FOD.

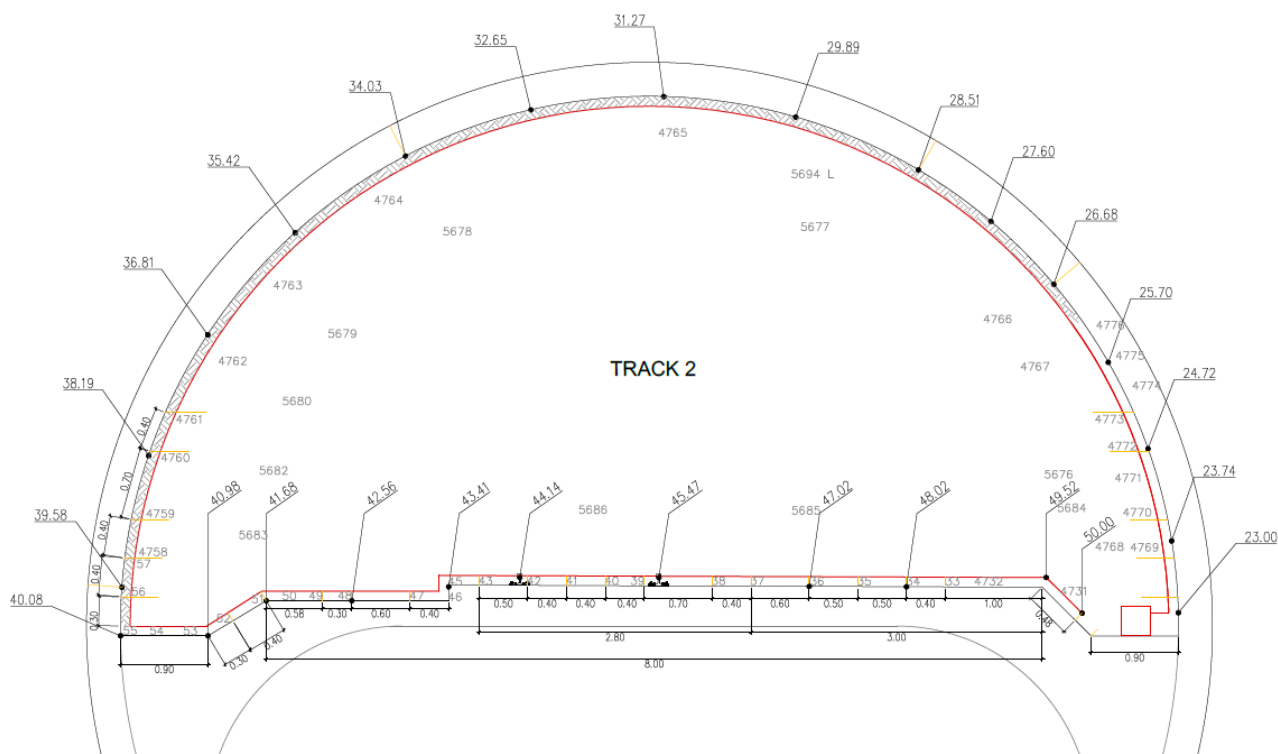


Figura 12. Tramo da seção do túnel e tramificação FOD.

A Tabela 3 a seguir mostra a identificação da Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 com o processo de trabalho realizado:

Tabela 3. Identificação de figuras.

Figura	Proceso de obra	Dia / Intervalo de dias	Comprimento de FOD
Figura 13	Estado inicial	4 out.	Comprimento total: 50 m
Figura 14	Pré-escavação	7 out.	Comprimento total: 50 m
Figura 15	Escavação	18 out. – 07 nov.	Comprimento total: 50 m
Figura 16	Concretagem da fundação	13 dez.	Comprimento total: 50 m
Figura 17	Evolução temporal	4 out. – 17 mai.	Comprimento total: 50 m

ESTADO INICIAL

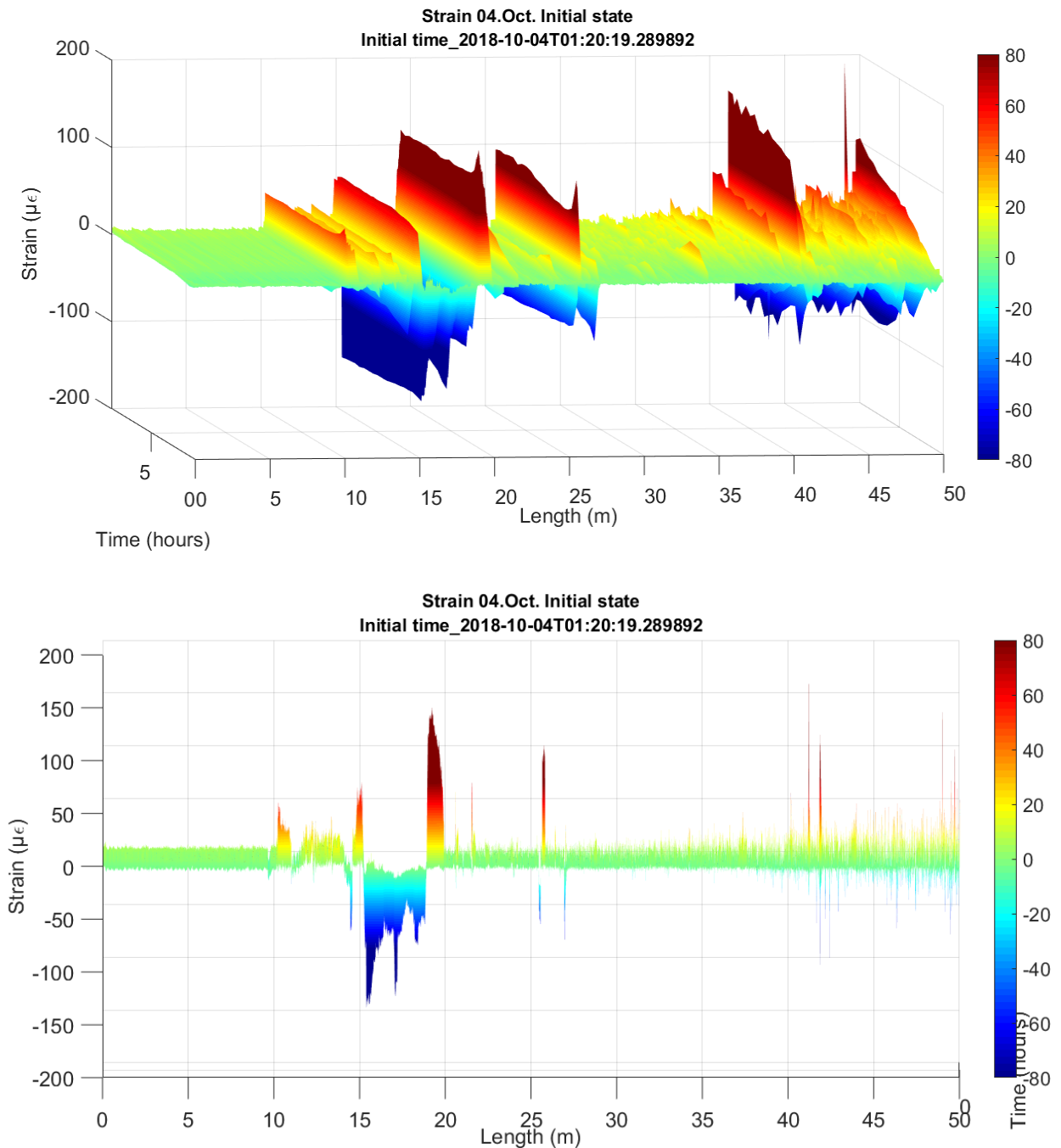


Figura 13. Estado inicial e de calibração. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

PRÉ-EXCAVAÇÃO

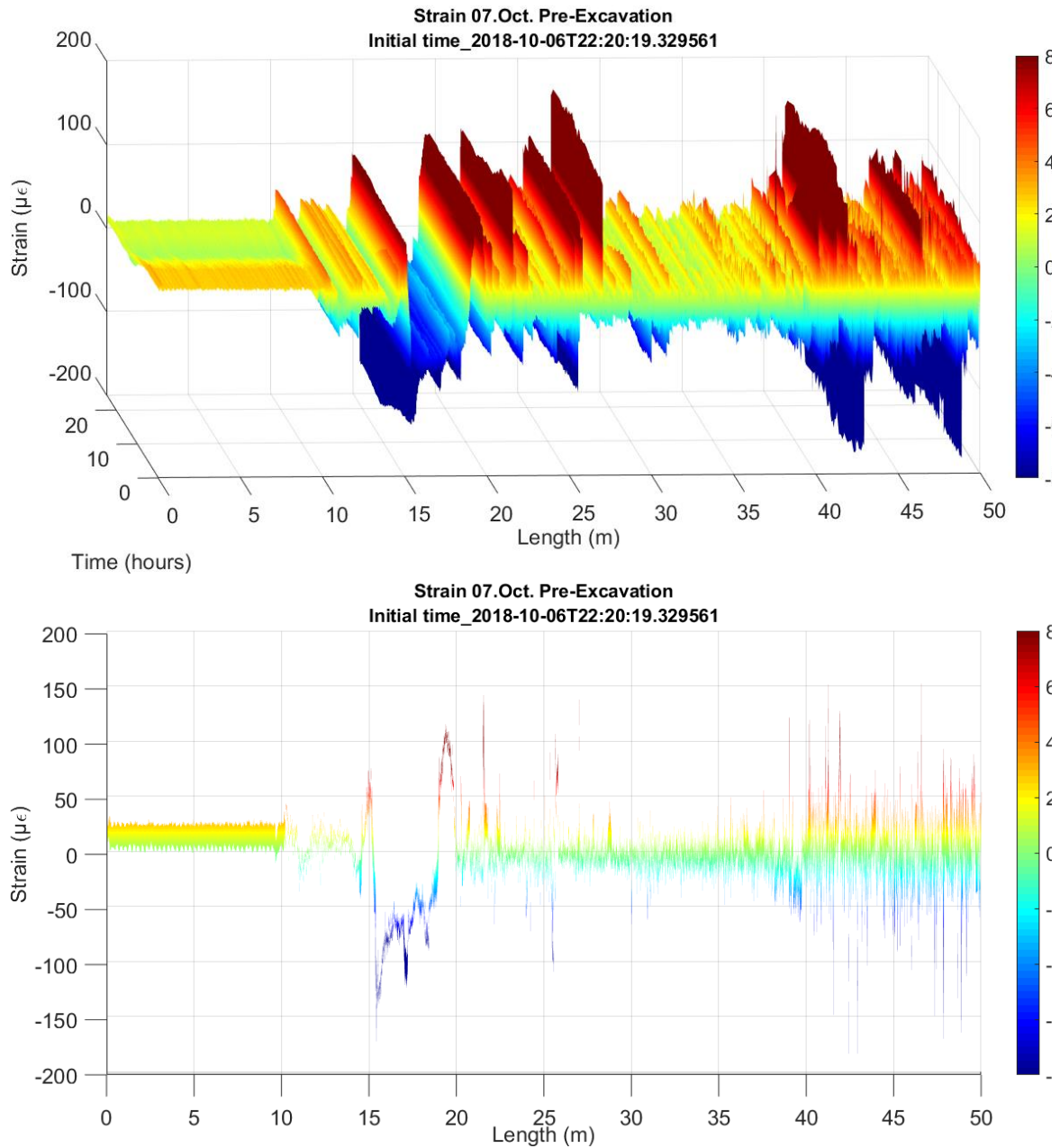


Figura 14. Pré-escavação. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

ESCAVAÇÃO

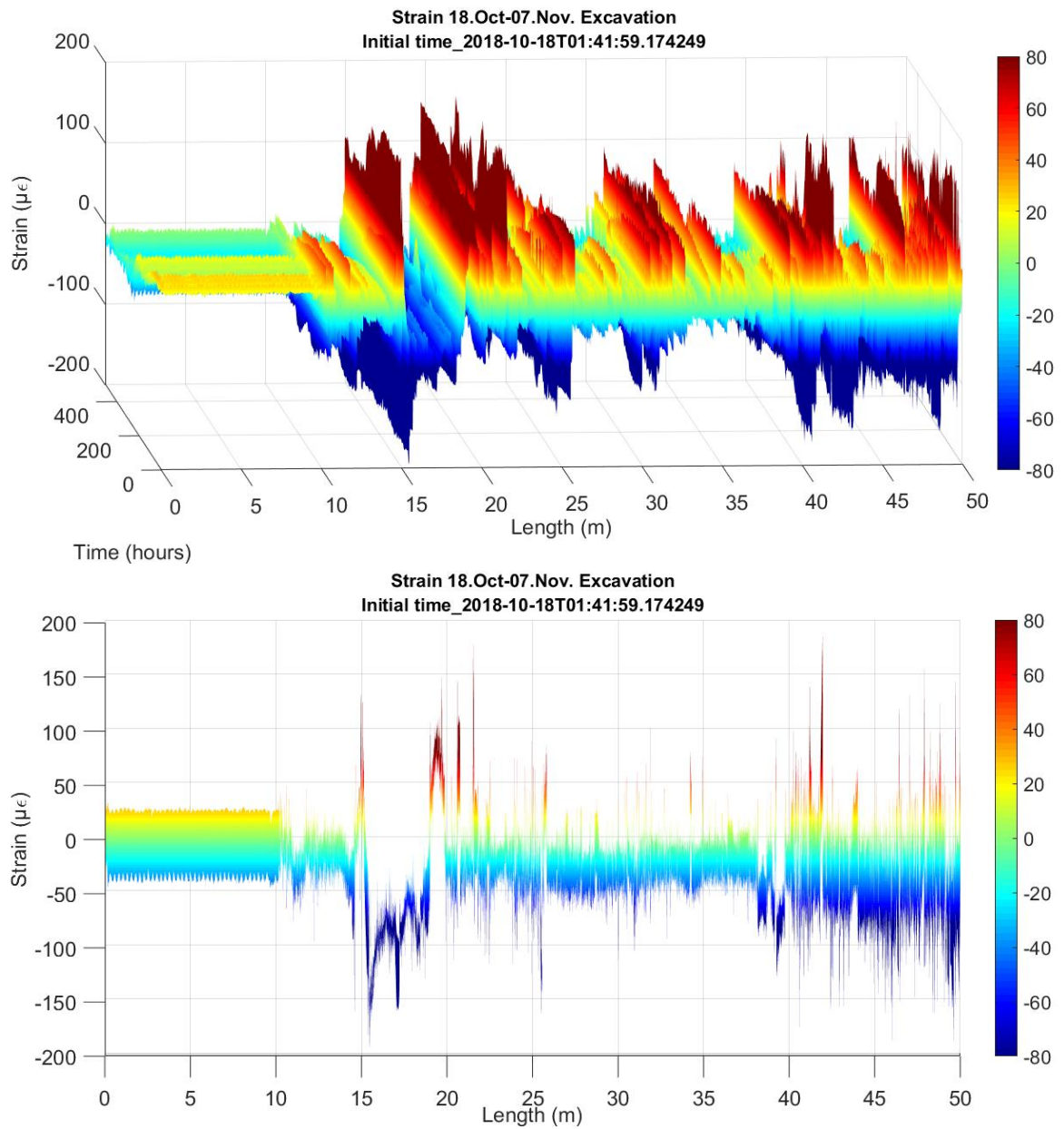


Figura 15. Escavação completa. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

EXECUÇÃO 1ER TRAMO FUNDACÃO

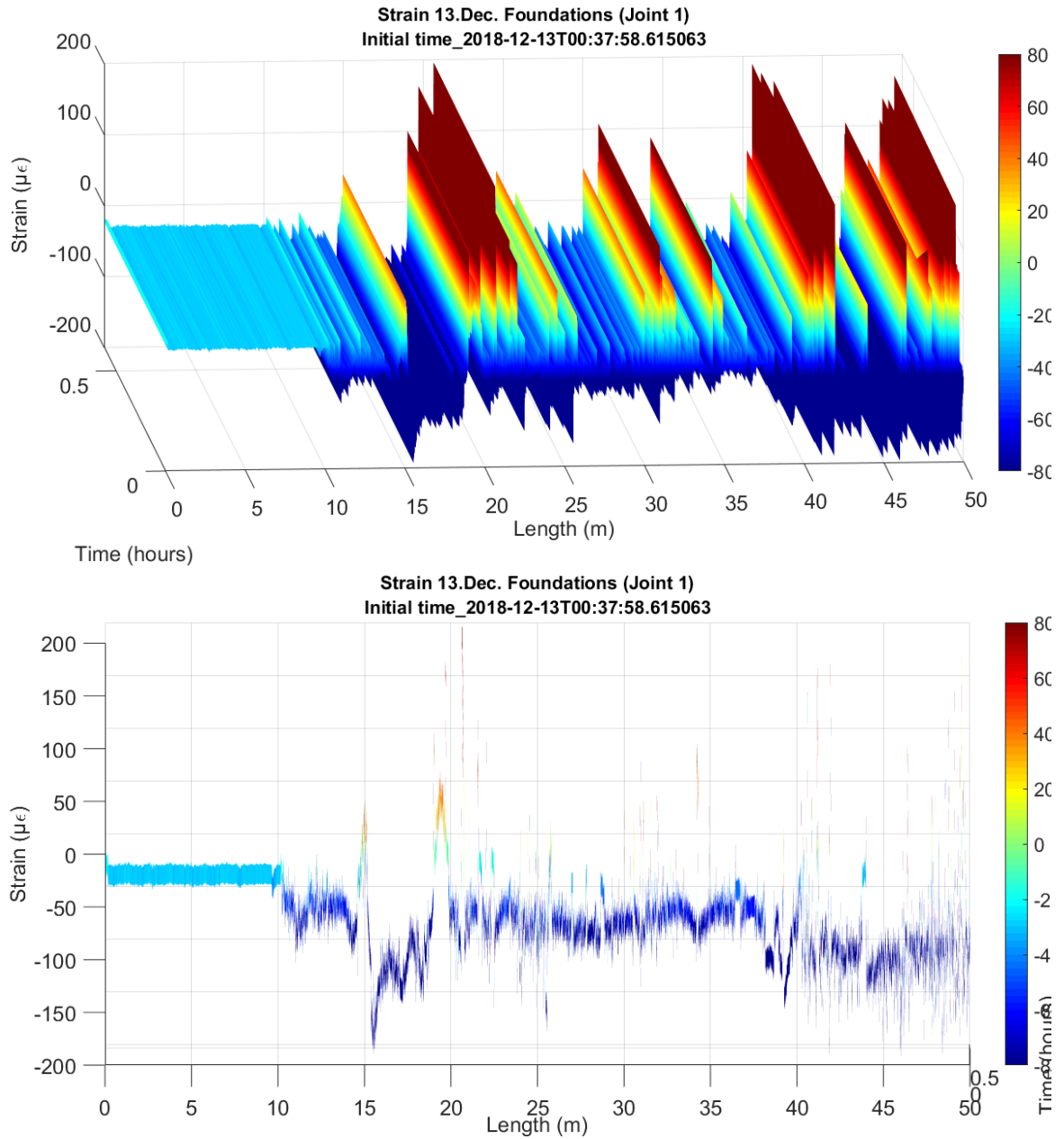


Figura 16. Execução do primeiro trecho da laje de fundação. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

EVOLUÇÃO TOTAL

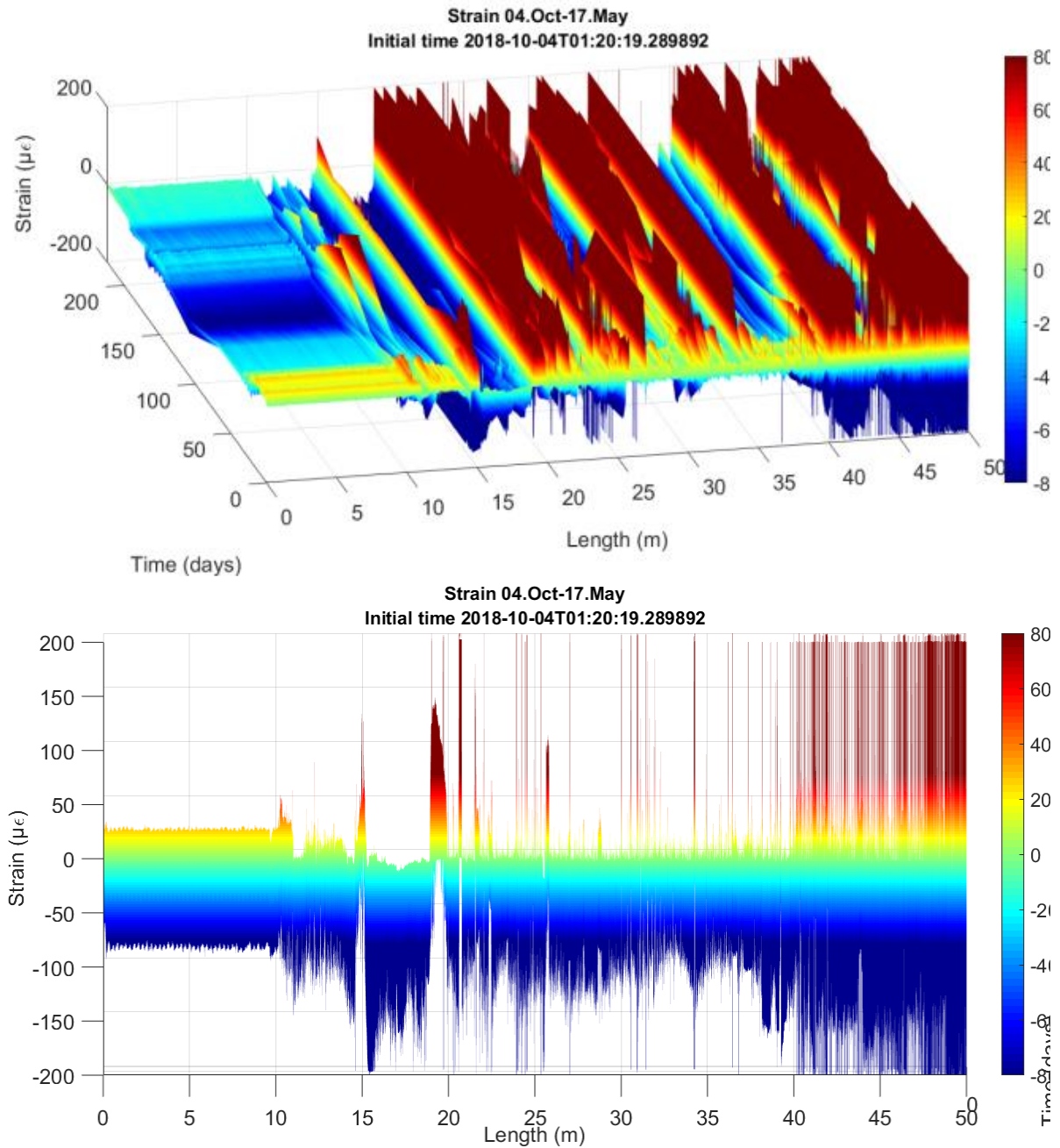


Figura 17. Evolução temporal de 4 de outubro e 17 de maio. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

Em seguida, na Figura 18 e Figura 19, o registro das leituras em 6 pontos críticos é incorporado ao longo da seção da abóboda do túnel.

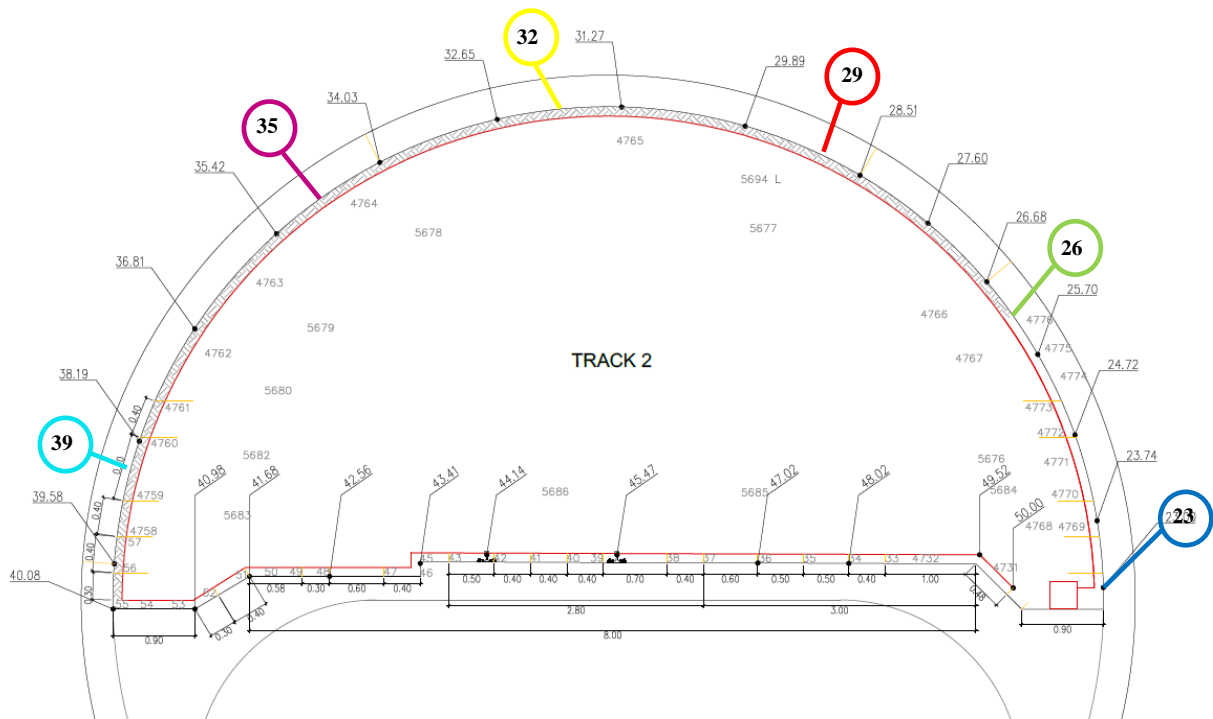


Figura 18. Identificação de pontos de controle críticos na abóboda do túnel.

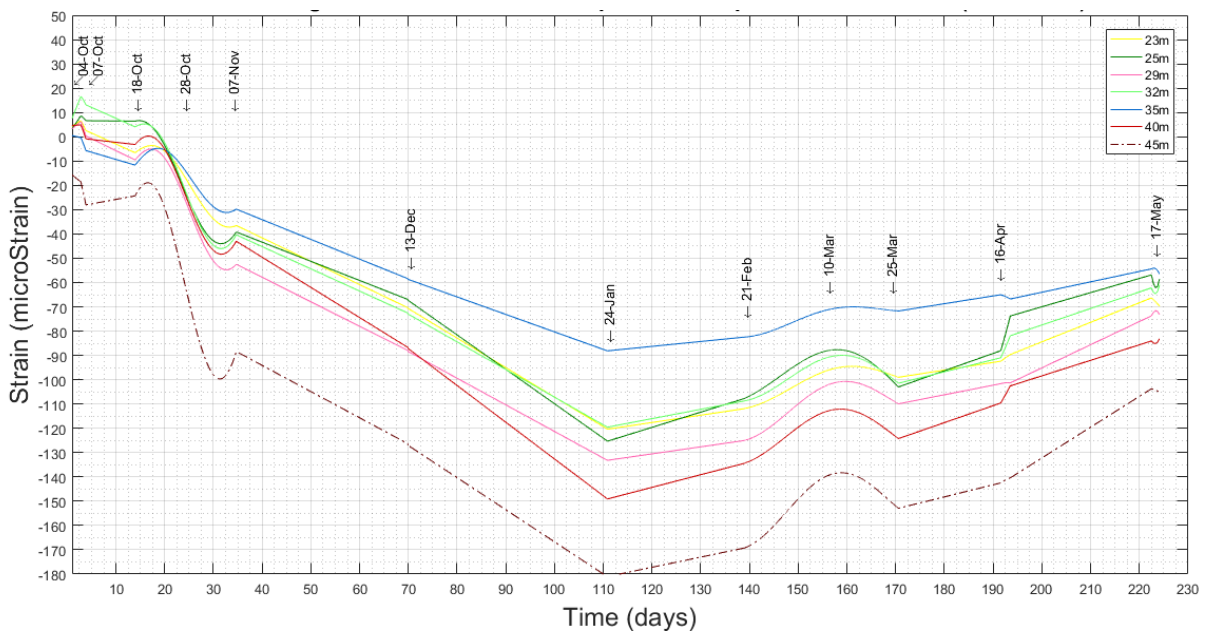


Figura 19. Evolução temporal de 4 de outubro de 2018 a 17 de maio de 2019 em pontos de controle críticos.

Em geral, observa-se que:

- 1) A seção da fibra entre 40 e 50m → corresponde à área da via. Nesta seção é onde há mais excitação da fibra dada a etapa do trilho. A vibração provocada pelo cruzamento da ferrovia faz com que neste trecho haja mais distorção de leituras. Mesmo assim, observa-se como essas variações de microdeformações registradas tendem a aumentar na compressão, o que é coerente no que diz respeito à descompressão e ovalização sofrida pela seção curva do túnel e que faz com que a laje atue como escora à esta ação. A ovalização do túnel é explicada no próximo ponto. Da mesma forma, em nenhum caso os valores obtidos ultrapassarão o limite de advertência estabelecido no Plano de Monitoramento e Contingência.
- 2) A seção da fibra entre 23 e 40m → corresponde à área da abóbada. Nesta seção observa-se como, em geral, houve um aumento das microdeformações de compressão ao longo da instrumentação. Isso se deve à descompressão ocasionada pela escavação e esvaziamento da terra da obra, de forma que esta descompressão produz uma certa “ovalização” do trecho, que se traduz em um aumento da compressão na fibra interna do trecho (a fibra interna da seção é comprimida e a fibra externa da seção é descomprimida). Percebe-se claramente como passa de uma cor verde (nula e deformação inicial) para uma cor azul que indica compressão. Da mesma forma, em nenhum caso os valores obtidos ultrapassarão o limite de advertência estabelecido no Plano de Monitoramento e Contingência.
- 3) Em relação à análise de tensões e a partir da definição do módulo de deformação longitudinal secante E_c do concreto e para um estado de tensão em condições de serviço, ou seja, para um estado ou estágio elástico onde as tensões das fibras de concreto da seção são proporcionais às deformações, entende-se que, mesmo observando esse aumento em $\mu\epsilon$, não induzem tensões excessivas no mesmo.
- 4) A seção de fibra entre 10 e 23m → corresponde à seção de monitoramento longitudinal. Os valores de compressão e tensão são observados nesta área, mas ao longo de sua evolução foram constantes em todos os momentos, ou seja, sem variação no que diz respeito à origem das leituras e calibração. Esse fato indica que nesta seção não houve variações na resposta à estrutura, ou seja, as ações realizadas não ocasionaram alterações de resposta apreciáveis na estrutura.
- 5) A seção de fibra entre 0 e 10m → corresponde à seção de fibra não colada. Nesta área, observa-se uma evolução linear sem alterações diferenciais, onde se verifica que não existem variações substanciais de temperatura que induzam variações significativas de tensão, de forma que não influenciam nas áreas restantes de FOD aderidas.

Da mesma forma, podem ser observados picos e/ou descontinuidades obtidos com o monitoramento, que correspondem às áreas de ligação entre trechos dos segmentos onde a fibra ótica sofre uma desaderência com o concreto, já desde sua implantação na origem. Esses picos permanecem estáveis no que diz respeito à sua localização.

4. CONCLUSÕES

A utilização de sensores de fibra ótica (Optical Backscatter Reflectometer) é uma tecnologia promissora para o monitoramento do estado estrutural, pois permite o monitoramento contínuo no tempo e no espaço da tensão e da temperatura ao longo da fibra.

Será efetuada o monitoramento de um tramo de túnel, o que envolve, até a data, o controle da estrutura em serviço durante os oito meses (outubro 2018 - maio 2019) que abrangem as obras de construção da estrutura de um edifício na via, até o nível do 1º andar, na área de construção acima do túnel.

O monitoramento tem servido para identificar e caracterizar tecnicamente os aumentos das tensões de tração e compressão, em decorrência das diferentes fases da obra, desde antes do início, com as leituras de calibração anteriores até a fase de construção da estrutura, na qual nos encontramos. O monitoramento continuará até o final das obras, previsto para novembro de 2020.

Durante este período de 8 meses, as variações de microdeformação da fibra FOD 1 foram de $153\mu\epsilon$, o que, traduzido em tensões, representa uma variação máxima de tensão de 5,75MPa.

Esses valores são aceitáveis para este tipo de estrutura, pois são valores de compressão no concreto. Por outro lado, esses valores incluem efeitos térmicos.

Com base nas variações obtidas no monitoramento da fibra FOD 1 ao longo deste meio ciclo térmico, pode-se considerar que o impacto da ação térmica no túnel foi desprezível

Uma vez confirmado que o túnel está em condições de segurança adequadas e concluída a obra, será disponibilizado um registro permanente para acesso ao trecho, podendo serem feitas leituras intermitentes ao longo de sua vida útil para determinar o comportamento diferido. Isso foi levantado dentro do plano obrigatório de manutenção do túnel.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos do IMHAB (Institut Municipal del Habitatge i Rehabilitació de Barcelona) e TMB (Transports de Barcelona, S.A.) pelas facilidades disponibilizadas para a gestão de todas as operações.

6. BIBLIOGRAFIA

Li, H., Li, D., Song, G. (2004), “Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering”. Engineering Structures, Volume 26, Issue 11, pp. 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>

Villalba, S., Casas, J. R. (2009), “Feasibility of Structural Health Monitoring of concrete structures by Optical Backscatter Reflectometer”. Proceedings of 7th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford University (USA).

Alegre, V., Villalba, S. (2013), “Estructuras inteligentes. Instrumentación con fibra óptica”. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2013. Colombia 2013. ISBN 978-958-58090-0-0.

Alegre, V., Villalba, S., Force, F., Ródenas, V. (2015), “Apeo y sustitución de un pilar de fábrica de ladrillo en un edificio modernista en uso”. XIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2015. Lisboa 2015.

Alegre, V., Villalba, S. (2017), “Avances en la instrumentación con fibra óptica”. XIV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2017. Vol. I. Control de Calidad. ISBN 978-99967-0-464-2.

Inspeção de manifestações patológicas em edifícios utilizando câmera termográfica integrada ao Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): uma pesquisa documental

W. P. A. Silva^{1*} , A. C. Lordsleem Júnior¹ , R. D. B. Ruiz¹ , J. H. A. Rocha² 

* Autor de Contato: wpas@poli.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

Recepção: 14/11/2019 | Aceitação: 30/10/2020 | Publicação: 01/01/2021

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo apresentar o emprego da câmera termográfica integrada ao VANT nos processos de inspeção de edifícios. O desenvolvimento do trabalho foi baseado em revisão sistemática de artigos e trabalhos da área de conhecimento, investigando as características e o funcionamento das câmeras termográficas, o emprego dos VANTs e os fatores que influenciam na detecção de manifestações patológicas. Os resultados permitiram identificar as vantagens e limitações da integração câmera e VANT, demonstrando a viabilidade e eficácia do uso conjunto. Como contribuição este trabalho proporcionou o desenvolvimento de um protocolo de voo ordenando as etapas e os procedimentos necessários para a realização de uma inspeção utilizando a câmera termográfica integrada ao VANT.

Palavras-chave: VANT; câmera térmica; inspeção predial.

Citar como: Silva, W. P. A., Lordsleem Júnior, A. C., Ruiz, R. D. B., Rocha, J. H. A. (2021), "Inspeção de manifestações patológicas em edifícios utilizando câmera termográfica integrada ao veículo aéreo não tripulado (VANT): uma pesquisa documental", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 123 – 139, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

¹ Grupo de Tecnologia e Gestão da Construção de Edifícios (POLITECH), Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor W. P. A. Silva contribuiu com a realização da revisão bibliográfica, coleta de dados, e redação do trabalho, o autor A. C. Lordsleem Júnior contribuiu com a orientação e coordenação da pesquisa, sendo o responsável pela ideia original. O autor R. D. B. Ruiz auxiliou nos processos de pesquisa e referencial teórico. Por sua vez, o autor J. H. A. Rocha foi fundamental nos processos de coleta de dados, revisão da redação e discussão dos resultados.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2021.

Inspection of pathological manifestations in buildings using a thermal imaging camera integrated with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): a documented research

ABSTRACT

This paper is intended to present usage of UAV integrated thermographic cameras in building inspection processes. This study was based on a systematic review of related articles and technical documents, in order to investigate features and basic operations of thermographic cameras, UAVs usage and influencing factors on detection of pathological manifestations. The results enabled identification of advantages and limitations for camera and UAV integration, thus demonstrating their feasibility and effectiveness when employed together. As a contribution, this study developed a flight protocol including steps and procedures required to perform an inspection using a thermal camera together with an UAV.

Keywords: UAV; thermal camera; building inspection.

Inspección de manifestaciones patológicas en edificios con cámara térmica integrada en Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT): una investigación documental

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar el uso de la cámara termográfica integrada en VANT en los procesos de inspección de edificios. El desarrollo de este trabajo se basó en una revisión sistemática de artículos y trabajos relacionados al tema, investigando las características y el funcionamiento de las cámaras termográficas, el uso de VANTs y los factores que influyen en la detección de manifestaciones patológicas. Los resultados permitieron identificar las ventajas y limitaciones de la integración de cámaras y VANT, demostrando la viabilidad y efectividad del uso conjunto. Como contribución, este trabajo proporcionó el desarrollo de un protocolo de vuelo que ordena los pasos y procedimientos necesarios para realizar una inspección utilizando la cámara térmica integrada en VANT.

Palabras clave: VANT; cámara térmica; inspección de edificios.

Informações legais

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

As manifestações patológicas estão presentes na maioria das edificações, seja com maior ou menor intensidade, variando o período de aparição sendo necessário o diagnóstico e reparo, ou então, de maneira complexa, exigindo uma análise individualizada (Ferreira e Lobão, 2018). No entanto, embora interfiram diretamente na vida útil e no desempenho da edificação, gerando desconforto e risco, tanto para as pessoas que utilizam diretamente o empreendimento quanto para os transeuntes de seu entorno, a análise e tratamento das manifestações patológicas não é uma prioridade (Bauer et al., 2011; Viégas, 2015). Em diversas ocasiões a estrutura não recebe a atenção que necessita em relação ao projeto, execução e manutenção, fato que aumenta a suscetibilidade do desenvolvimento e agravamento das manifestações patológicas (Silva, 2007).

Em vista disso, é imprescindível o processo de investigação e monitoramento da estrutura, pois tais procedimentos permitem o acompanhamento do comportamento da mesma ao longo do uso do empreendimento, recolhendo informações que ao serem enviada para os modelos de análise e decisão permitem acompanhar e detectar avarias (Agostinho, 2012). Nesse sentido, os ensaios destrutivos aplicados em materiais, componentes ou sistemas construtivos tornam-se indesejáveis quando se trata de diagnóstico de problemas no contexto das edificações em uso (Freitas et al., 2014). Com efeito, o desenvolvimento de técnicas não destrutivas que visem ao diagnóstico de deteriorações nas construções, de forma geral, vem sendo objeto de estudo de muitas pesquisas. A partir daí, o uso da termografia infravermelha e de veículos aéreos não tripulados (VANT) nos processos de inspeção de edifícios vem sendo explorado e difundido na sociedade (Nascimento, 2014; Ellenberg et al., 2016; Entrop e Vasenev, 2017).

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva de imagens de sensoriamento remoto utilizada para detectar falhas em equipamentos elétricos, bem como alterações em diferentes partes da edificação, como a cobertura, os sistemas estruturais, os sistemas de vedação em alvenaria e os revestimentos. Uma dessas alterações refere-se à detecção de excessos de umidade e temperatura, responsáveis por danos nos materiais, com reflexos na saúde dos usuários (Cortizo, 2007; Lerma et al., 2011; Freitas et al., 2014). No entanto, embora a técnica da termografia infravermelha seja amplamente difundida nos países europeus, graças ao acervo histórico, no Brasil sua utilização é relativamente incipiente, seja pelo custo dos equipamentos de análise, seja pela dificuldade de aplicação prática (Cortizo et al., 2008).

Em paralelo, o uso de VANT tem sido alvo de estudos no que diz respeito à inspeção de edificações para verificar as condições de desempenho e determinar medidas preventivas e corretivas que se fizerem necessárias, em virtude da inerente complexidade (altura, tamanho, dificuldades de acesso e condições exposição) (Witczuk et al., 2017). O VANT pode reduzir o tempo destas operações de monitoramento, bem como, auxiliar em outros processos de inspeção que colocam em risco a vida humana (Álvarez et al., 2016). Neste contexto, o presente artigo trata da aplicação de câmera infravermelha integrada aos veículos aéreos não tripulados (VANT) como ferramenta de inspeção e monitoramento de edifícios, explanando acerca dos fatores processuais (fatores que influenciam na obtenção de termogramas precisos para a identificação de manifestações patológicas), além das vantagens e limitações dessa tecnologia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha constitui uma ferramenta preditiva usada no diagnóstico precoce de falhas e outros problemas (estudo de análise de desempenho, a fim de prever e apontar eventuais anomalias, auxiliando na manutenção preventiva). Os resultados são apresentados instantaneamente, durante a inspeção, na forma de imagens térmicas ou termogramas, que representam a distribuição da temperatura superficial do objeto observado e, como tal, registrados para fins das subseqüentes providências, por parte dos interessados e posterior arquivamento (ITC, 2014).

Os sistemas de termografia infravermelha captam a radiação térmica, representada no espectro eletromagnético, pelo fato de todos os corpos estarem a uma temperatura superior ao zero absoluto emitindo radiação, e convertem-na num termograma o qual possui uma escala policromática (cores) ou monocromática (cinza). O fenômeno da radiação infravermelha (IR) foi descoberto por William Herschel em 1800 e, em 1821, houve a descoberta do efeito termoelétrico por Thomas Johann Seebeck, que é a conversão direta da diferença de temperatura em tensão elétrica e vice-versa, sendo esse efeito a base para o funcionamento câmeras térmicas (Mistry, 2009; Viégas, 2015). A radiação térmica emitida por um objeto e captado pela câmera térmica é dada pela lei de Stefan-Boltzmann (1).

$$E = \frac{q}{A} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (1)$$

Onde E é a radiação emitida pelo objeto (W/m²), q é o grau de emissão de energia (W), A é a área da superfície emissora (m²), T é a temperatura absoluta (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann de valor $5.676 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, e ε é a emissividade da superfície emissora, cujo valor está entre 0 e 1, e indica o quanto a superfície se aproxima do comportamento de um corpo negro, que seria uma superfície ideal onde a taxa de radiação seria máxima, logo $\varepsilon=1$. (Çengel e Ghajar, 2012).

Ademais, essa técnica pode ser classificada em ativa e passiva, de acordo com a excitação térmica utilizada. Na termografia ativa, um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Diferentes técnicas podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto de estudo, cada qual com características e limitações próprias. A escolha do tipo de estímulo térmico depende das características do objeto a ser testado e do tipo de informação a ser pesquisada (Batista, 2019).

Em contrapartida, para utilização da termografia passiva, onde nenhuma estimulação artificial é utilizada, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente está a uma temperatura mais elevada. A análise pelo método passivo conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante (Cortizo, 2007). Portanto, conforme demonstrado na Figura 1, as câmeras termográficas capturam a energia infravermelha emitida pelos objetos e convertem em um sinal elétrico e, finalmente, em uma imagem visível, em que cada nível de energia é representado em uma escala de cores (Meola e Carlomagno, 2004).

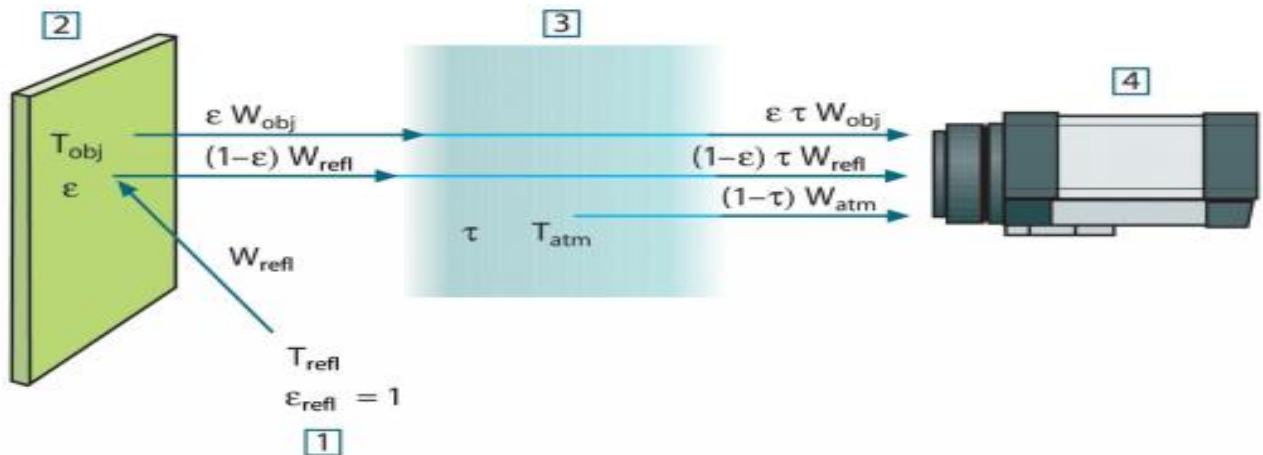


Figura 1. Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. 1) meio adjacente, 2) objeto, 3) atmosfera, 4) câmera. T_{obj} : temperatura do objeto, T_{refl} : temperatura refletida, T_{atm} : temperatura da atmosfera. W_{obj} : potência da radiação emitida pelo objeto, W_{refl} : potência da radiação emitida pelo meio adjacente, W_{atm} : potência da radiação emitida pela atmosfera (Caldeira e Padaratz, 2015).

Assim, essa técnica aplicada em edifícios pode ser utilizada para avaliar o conforto do revestimento do piso (Barreira et al., 2013), detectar defeitos de isolamento, vazamentos de ar (Ocaña et al., 2004) problemas de umidade (danos nos telhados, teor de umidade nas paredes), pontes térmicas (Asdrubali et al., 2012), para inspecionar sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), detalhes de construção (Cerdeira et al., 2011; Barreira et al., 2013) e também, na inspeção predial (Brique, 2016), conforme demonstrado na Figura 2.

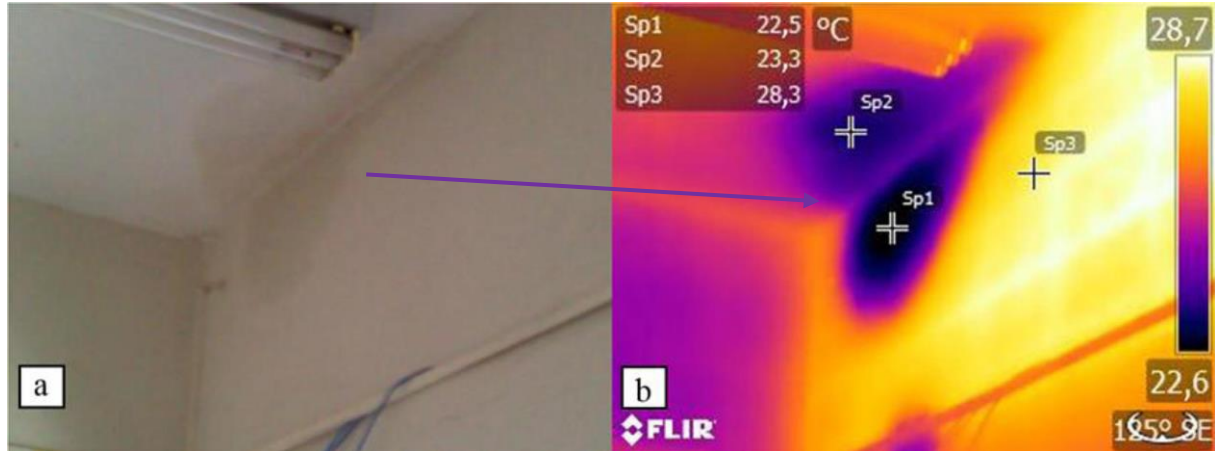


Figura 2. Penetração de água da chuva: (a) imagen digital e (b) termograma (Rocha et al., 2018).

Em vista das variáveis destacadas na Tabela 1, quanto maior a resolução térmica (pixels) da câmera, é possível inspecionar áreas maiores com maior precisão. Assim, no uso de câmeras térmicas integradas ao VANT, as mesmas devem ter a melhor resolução possível. Ademais, o valor do IFOV (*Instantaneous Field of View*) e o ângulo de abertura da lente são um dos principais limitantes nos estudos envolvendo a análise de edifícios. Quanto maiores sejam estes parâmetros, menor será a resolução dos termogramas e a precisão do estudo. (Andrade et al., 2019). Além disso, é necessário destacar que a inspeção é limitada apenas a uma aplicação passiva da termografia infravermelha, o que significaria que a inspeção da estrutura não seria possível todos os dias ou seria restrita a horários determinados localmente.

Tabela 1. Principais variáveis relacionadas a câmera termográfica (Andrade et al., 2019)

RESOLUÇÃO DA CÂMERA PIXELS	IFOV (<i>Instantaneous Field of View</i>)	ÂNGULO DE ABERTURA DE LENTE
60 x 60, 120 x 120, 240 x 380, 320 x 240, 640 x 480.	O valor varia entre 0,6 e 3,7 mrad, empregando a lente do equipamento.	As lentes mais comuns são as de 15 e 25 graus, todavia pode variar entre 7 e 80 graus.

2.2 VANTs

Os Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) são segundo a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil, 2017) qualquer aeronave não tripulada que pode ser remotamente pilotada, ou automatizada. Essas aeronaves são pilotadas remotamente ou de forma automática através da utilização de coordenadas pré-definidas. Trata-se de uma tecnologia em ascensão que a cada dia tem sua utilização disseminada em várias áreas (Nascimento, 2014). Os primeiros desenvolvimentos para VANT começaram na década de 50 e destinavam-se exclusivamente para fins militares. Diferentes projetos foram iniciados em diversos países com o objetivo de produzir veículos capazes de transportar missões sem piloto a bordo de modo a evitar ainda mais perdas (Agostinho, 2012). Com o passar do tempo a tecnologia passou a ser disseminada, e sua primeira utilização para um fim não militar ocorreu em 1986, para monitorar incêndios florestais em Montana nos Estados Unidos (Agostinho, 2012). Nesse sentido, o crescimento do uso de VANT se dá devido ao baixo custo, agilidade de coleta de processamento, facilidade de manobra das aeronaves, e ao eficiente sistema de captura de imagem (Seibert e Teizer, 2014).

Além disso, os VANT são ferramentas eficazes para realização de procedimentos de sensoriamento remoto, sendo o principal argumento para o seu uso a capacidade de alcançar locais de difícil acesso, aliado a gama de sensores aplicáveis que podem ser incorporados ao mesmo, como câmara infravermelha, detecção de luz e sensores de distância (LIDAR, em inglês *Light Detection And Ranging*) (Freimuth e König, 2018).

Em vista disso, atualmente no mercado existem dois tipos de VANTs, onde a diferença básica se refere ao sistema aerodinâmico, sendo ele de asa rotativa ou fixa. O primeiro se assemelha a um helicóptero ou multirrotor, são aeronaves compactas de fácil operação e menor custo. Em contrapartida, os de asa fixa apresentam tamanhos variados de acordo com a funcionalidade. (Jorge e Inamasu, 2014; Melo e Costa, 2015).

Tabela 2. Classificação dos VANTs (Bento, 2008).

CATEGORIA	ACRÔNIMO	ALCANCE [km]	ALTITUDE VOO [m]	AUTONOMIA [h]	PESO [kg]
<i>Micro</i>	μ (micro)	< 10	250	1	<5
<i>Mini</i>	Mini	< 10	150 – 3000	< 2	150
<i>Close Range</i>	CR	10 – 30	3000	2 – 4	150
<i>Short Range</i>	SR	30 – 70	3000	3 – 6	200
<i>Medium Range</i>	MR	70 – 200	5000	6 – 10	1250
<i>Medium Range</i> <i>Endurance</i>	MRE	>500	8000	10 – 18	1250
<i>Low Altitude</i> <i>Deep Penetration</i>	LADP	>250	50 – 9000	0,5 – 1	350
<i>Low Altitude</i> <i>Long Endurance</i>	LALE	>500	3000	>24	<30
<i>Medium Altitude</i> <i>Long Endurance</i>	MALE	>500	14000	24 – 48	1500

A Tabela 2 mostra que os UAVs usados no processo de inspeção de construção em geral têm peso inferior a 150 kg. A autonomia de voo, um fator dominante para o desenvolvimento do protocolo de voo e eficiência no monitoramento de edifícios, é inferior a duas horas.

2.3 A termografia integrada ao VANT

Embora a termografia e os VANTs sejam alvo de diferentes pesquisas recentes, é ainda mais incipiente o estudo integrado de ambos. Analisar os benefícios relacionados a esses dois tópicos motiva a combinação de suas funcionalidades para obter benefícios mútuos (Entrop e Vasenev, 2017). A câmera térmica integrada ao VANT é uma importante ferramenta para avaliar grandes áreas de forma automatizada e com reduzida demanda de tempo para a execução (Viana et al., 2018). Os principais desafios dessa tecnologia são a baixa resolução de algumas câmeras termográficas, regulamentos que limitam as operações envolvendo VANT à linha visual e a alta dependência do clima (Witczuk et al., 2017).

Além disso, os sensores de calor são uma opção de carga útil para geração de imagens térmicas aéreas de alta resolução. Esta tecnologia permite o levantamento rápido e seguro de áreas térmicas, muitas vezes presentes em terrenos inacessíveis ou perigosos (Harvey et al., 2016). Essas imagens coletadas pelo VANT tem o potencial de se tornar uma ferramenta fundamental na ciência geotérmica, incluindo levantamentos geológicos, geoquímicos e geofísicos, linha de base para estudos e monitoramentos ambientais, geotécnicos e obras civis, destacando-se no caso desta pesquisa, a inspeção de edifícios. Tal tecnologia pode ser utilizada para o mapeamento de perda de calor, além de poder reunir informações térmicas, tais como vazamentos de calor, empregando uma câmera infravermelha e fazendo o processamento da imagem obtida. Embora, a realização das inspeções seja um processo menos difícil para edificações de pequena altura, coletar dados térmicos com o aumento da altura, notadamente em arranha-céus e telhados é muito mais complexo, sendo um processo perigoso (Kayan et al., 2018). A termografia aérea é uma tecnologia que tem sido utilizada nos tempos recentes para gravar imagens térmicas sem a necessidade de acesso aos edifícios, além de ser capaz de alcançar uma área de difícil acesso, como os telhados, enquanto carrega câmeras infravermelhas e outros sensores (Chu et al., 2016).

Portanto, a combinação da termografia por infravermelho com os VANTs permite que as tarefas de manutenção sejam otimizadas (Muñoz et al., 2017) e, conseqüentemente, trazendo vantagens econômicas significativas (Ramírez et al., 2018). Tais aspectos se devem ao fato dos VANTs poderem ser equipados com câmeras de alta resolução permitindo aos usuários obter dados em tempo real. Ademais, as imagens aéreas que antes eram capturadas de um avião leve ou helicóptero, e o custo do combustível, são desvantagens que tornam os VANTs mais viáveis, uma vez que a fonte de energia para o seu voo pode ser facilmente recarregada (Lavars, 2015). Assim, sendo equipado com uma câmera termográfica de alta resolução o VANT se torna uma excelente ferramenta para coletar informações térmicas de edifícios (Zhang et al., 2015). Nesse sentido, a Figura 3, demonstra um modelo de VANT que já vem integrado com câmera digital em paralelo com a câmera termográfica, diferente de outros modelos em que é necessário remover a primeira para posteriormente instalar a segunda.



Figura 3. VANT com câmera termográfica acoplada à câmera digital. (Topdrone, 2020).

3. INSPEÇÃO DE EDIFÍCIOS

A aplicação da termografia nos processos de inspeção é baseada na existência de anomalias ou defeitos que influenciam nas propriedades térmicas da estrutura, na Figura 4 os defeitos interrompem a transferência de calor do concreto, visto que os vazios existentes são preenchidos com ar ou água, e devido a diferença de condutibilidade térmica dos materiais, é verificado a variação da temperatura ao longo da estrutura (Rocha e Póvoas, 2017).

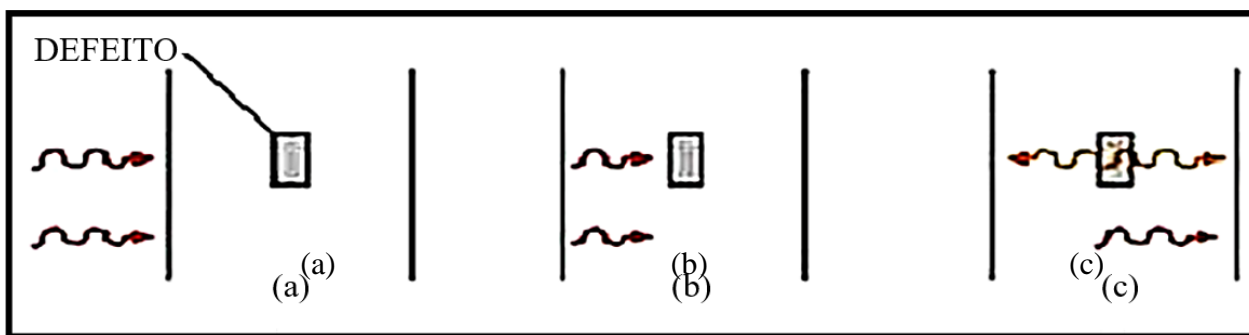


Figura 4. Propagação idealizada de um único pulso de calor em um material: (a) Um impulso de energia aplicado a superfície; (b) O pulso de calor viaja dentro do material e encontra um defeito; (c) O defeito reflete parcialmente e transmite parcialmente o pulso (Cortizo, 2007).

Ademais, a termografia infravermelha produz uma imagem térmica, em que cada cor representa um nível de temperatura superficial dos objetos. Por meio da análise da imagem obtida pelo equipamento, é possível identificar a existência de focos de umidade, anomalias, elementos ocultos, entre outros (Grinzato et al., 2011). Em consequência disso, com a termografia infravermelha é possível detectar somente anomalias associadas a modificações mensuráveis das características térmicas como fluxo de calor e temperaturas resultantes, e manifestações patológicas com profundidades limitadas, ou seja, próximas a superfície (Bauer e Pavón, 2015). Assim, na construção civil, uma variação de temperatura de 1°C até 2°C é geralmente um indicativo ou uma suspeição de existência de problemas. A partir de 4°C pode-se afirmar a existência de anormalidade no corpo (Maldague e Marinetti, 1996; Cortizo et al., 2008).

Portanto, com essa tecnologia é possível identificar falhas de aderência ou ausência de argamassa (Bauer et al., 2015), presença de umidade confinada em revestimentos cerâmicos (Edis et al., 2014; Bauer e Pavón, 2015), além da existência de fissuras, problemas de descolamento, e infiltrações, visto o gradiente térmico verificado no termograma. (Freitas et al., 2014; Viégas, 2015; Rocha e Póvoas, 2017; Takeda e Mazer, 2018; Batista, 2019).

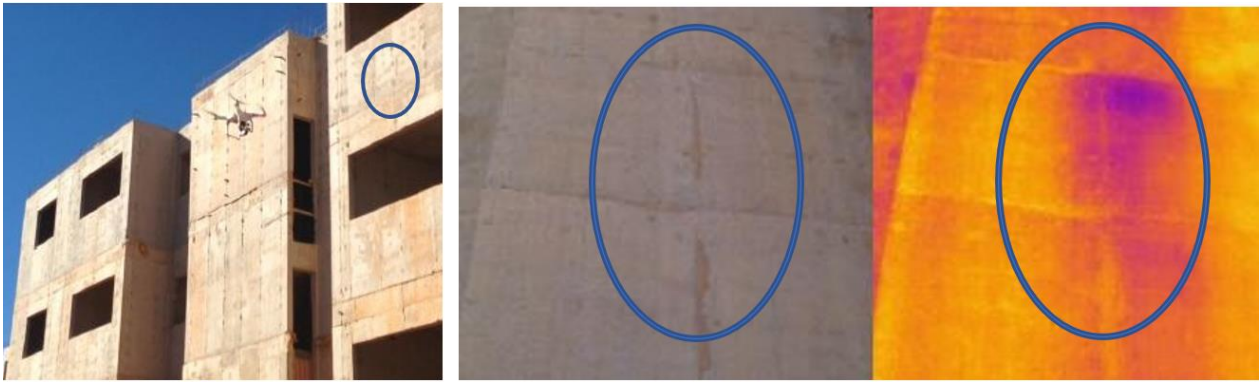


Figura 5. Inspeção com VANT integrado com câmera térmica (Nascimento, 2014)

No caso da Figura 5, de acordo com Nascimento (2014), as imagens foram obtidas no início da manhã sendo possível o reconhecimento de regiões com fissuras e infiltrações, pois o clima estava ameno e possibilitou uma maior diferença no gradiente de temperatura, sendo as regiões mais claras as que apresentam maior temperatura do que as que estão representada em tons mais escuros.

3.1 Vantagens e limitações

Na Tabela 3 são apresentadas as principais vantagens e limitações do uso da câmera termográfica integrada ao VANT de acordo com a literatura (Yehia et al., 2007; Agostinho, 2012; Sham et al., 2012; Jorge e Inamasu, 2014; Mavromatidis et al., 2014; Seibert e Teizer, 2014; Domingues, 2015; Melo e Costa, 2015; Pajares, 2015; Watase et al., 2015; Zhang et al., 2015; Ariwoola, 2016; Ellenberg et al., 2016; Hiasa et al., 2016; Rehman et al., 2016; Entrop e Vasenev, 2017; Muñoz et al., 2017; Witczuk et al., 2017; Freimuth e König, 2018); Ramírez et al., 2018; Andrade et al., 2019).

Tabela 3. Vantagens e limitações do uso da câmera termográfica integrada ao VANT.

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de alcançar áreas de difícil acesso; <ul style="list-style-type: none"> • Obter dados em tempo real; • Reduzir riscos operacionais; • Aumentar a segurança do operador e dos colaboradores envolvidos; • Redução no tempo de inspeção, gerando economia e agilizando o planejamento de recuperação da estrutura; • Maior confiabilidade se comparada aos métodos convencionais; • Tecnologia rápida, não-invasiva, não destrutiva e sem contato; • Pode ser aplicada a uma distância considerável para se analisar e inspecionar grandes áreas em pequenos intervalos de tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Autonomia de voo entre 30 min a 2 h, em modelos com menos de 150 kg; <ul style="list-style-type: none"> • Condições climáticas favoráveis, implicando tanto no voo quanto na emissividade calorífica da superfície; <ul style="list-style-type: none"> • Sujeito as regulamentações e restrições locais para realização do voo, não sendo possível ser realizado em qualquer localidade; • Interferência nos resultados devido a reflexões caso seja utilizada em um prédio que tenha edifícios vizinhos com fachadas espelhadas; <ul style="list-style-type: none"> • Alterações em leituras obtidas a distâncias superiores a 10 metros entre a câmera e objeto estudado; • Não é possível medir a espessura e a profundidade da manifestação patológica.

Por meio da Tabela 3 é possível constatar que as principais vantagens do uso dessa tecnologia estão ligadas ao fato da otimização dos procedimentos de inspeção, obtendo dados em tempo real e em um menor intervalo de tempo. Em contrapartida, suas limitações estão relacionadas aos requisitos necessários para a obtenção de um termograma preciso, destacando-se as condições climáticas favoráveis e leituras efetuadas a partir de ângulos e distâncias que não interfiram nos resultados. Por fim, um dos fatores preponderantes para o uso da termografia aérea está relacionado ao custo da operação e dos equipamentos, no entanto, realizando uma comparação dos benefícios dessa ferramenta, em relação aos métodos convencionais, verifica-se as suas potencialidades, visto a velocidade de obtenção dos dados e a segurança do responsável pela inspeção (Mavromatidis et al., 2014; Ariwoola, 2016).

3.2 Fatores processuais referente à leitura térmica

A análise termográfica é um procedimento o qual o inspetor opera o termovisor, aponta-o para o objeto em inspeção e detecta o defeito através da análise do termograma obtido. Apesar da simplicidade aparente da técnica, a análise dos resultados pode ser complicada e até conduzir a conclusões erradas caso não sejam tomadas certas precauções antes e durante a realização do ensaio (Brique, 2016). Logo, o próprio operador deve ter conhecimento da forte influência da radiação solar, do vento, da chuva, e na forma como esses fatores afetam a distribuição térmica do objeto analisado em ambiente aberto (Batista, 2019).

Em vista disso, para se garantir a qualidade da imagem, a sensibilidade e o contraste térmico, é necessário estar atento a alguns fatores como a emissividade do material que é função da temperatura superficial e do ângulo de observação, na refletividade da superfície, função da radiação direta incidente e da radiação presença de fontes externas (sombras, reflexões), distância e ângulo de medição. (Barreira, 2004; Cortizo, 2007; Bauer, 2015; Viégas, 2015; Batista, 2019). Outrossim, o calor irradiado pelo sol pode afetar a medição termográfica, pois altera o fluxo normal de calor do interior para o exterior. A distância do equipamento ao objeto pode alterar a leitura da temperatura superficial, pois diminui a resolução dos termogramas e influencia a atenuação atmosférica (Labat et al., 2011).

Em relação ao horário de inspeção, foi verificado que há divergências entre os autores, mas que esse parâmetro depende das condições ambientais do local do objeto em estudo (Rocha e Póvoas, 2017). Nesse sentido, foi verificado comportamentos distintos em relação aos períodos de medição (seco e chuvoso), aos horários 8h, 15h e 21h (Freitas et al., 2014). Em outros casos, foram realizadas medições em horários distintos no período da manhã e da tarde (Nascimento, 2014), visto que a emissividade de materiais não compostos por metais diminui com o aumento da temperatura (Barreira, 2004). Houve ainda casos em que se optou por verificar as medições durante todo o dia (6-18h), a fim de avaliar os melhores horários de medição, tanto na parte da manhã como da tarde (Viégas, 2015).

Por fim, alguns autores (Uemoto, 2000; Watase et al., 2015; Hiasa et al., 2016) recomendam a inspeção durante a noite para eliminar os efeitos da radiação solar, e ter uma melhor visão entre o defeito e as regiões intactas, evitando falsas detecções (Rocha e Póvoas, 2017).

Além disso, os gradientes térmicos e a turbulência alteram o índice de refração do ar provocando uma redução na qualidade da imagem. Em paralelo, a atmosfera presente entre a fonte emissora e o receptor pode originar perturbações na medição. Logo, deve-se manter a distância de 10 metros entre a fonte emissora e o receptor, corrigindo-se as medições feitas com distâncias superiores (Barreira, 2004; Comitti, 2012; Viégas, 2015). Ademais, em dias com ventos acima de 7m/s não se deve realizar medições com termografia infravermelha, pois os dados obtidos induzirão ao erro da análise térmica do objeto (ITC, 2014).

De acordo com a norma NBR 15572 (ABNT, 2013), é necessário que o ângulo entre o termovisor e o ponto inspecionado seja o mais perpendicular possível, para que não haja redução na

emissividade devido aos ângulos de observação inadequados (maiores que 60°).

Assim, Viégas (2015) afirma que não se deve permanecer diretamente na frente do alvo para que não haja reflexão do calor do termografista, para tanto é recomendado posicionar-se a uma angulação de mais ou menos 5°, com relação à horizontal do objeto a ser analisado termicamente, conforme a Figura 6.

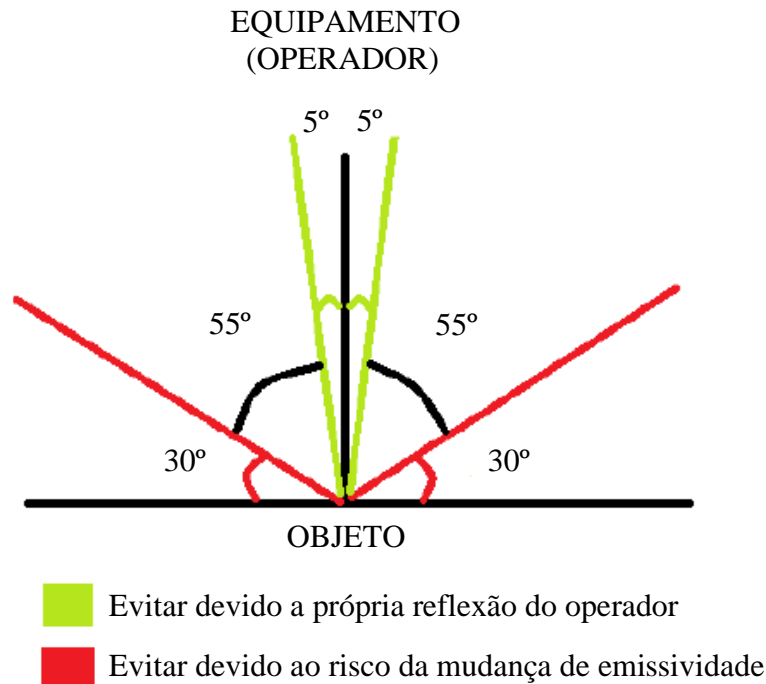


Figura 6. Ângulos de medição: cuidados (Viégas, 2015)

3.3 Protocolo de voo

O planejamento e desenvolvimento do projeto poderá variar consoante a capacidade de voo, sendo influenciando pela a precisão e a trajetória dos mesmos (Agostinho, 2012). Todavia, percebe-se que as ferramentas de preparação de voo comercialmente disponíveis, em alguns casos ainda são insuficientes para se realizar determinadas inspeções, cabendo ao operador criar suas próprias ferramentas e o seus protocolos (Seibert e Teizer, 2014). Em decorrência disso, o protocolo abaixo, Figura 7 e Tabela 4, foi desenvolvido baseado no trabalho de diversos autores (Agostinho, 2012; Siebert e Teizer, 2014; Ariwoola, 2016; Ellenberg et al., 2016; Entrop e Vasenv, 2017; Freimuth e König, 2018).



Figura 7. Etapas do protocolo de voo.

Tabela 4. Protocolo de Voo

ETAPAS	PROCEDIMENTOS
1. Análise das interações dinâmicas do voo	Nessa etapa é necessário verificar a regulamentação sobre o uso de VANT do local onde será feita a inspeção, além de um estudo sobre as condições climáticas da data, e configuração do objeto a ser estudado (área, quantidade de pavimentos, gabarito máximo), e assim, proceder com a escolha dos equipamentos.
2. Descrição da área de voo	Na segunda etapa é preciso realizar um voo teste com o intuito de se determinar as áreas de risco, além de estabelecer os ângulos e as distâncias de leitura.
3. Construção da trajetória de voo	Determinada as áreas de risco, deve-se com a construção de uma trajetória de voo, de tal forma que seja possível realizar a mesma com 75% de carga do VANT, garantindo a autonomia de voo.
4. Realização da inspeção	Finalizada as etapas anteriores, é possível iniciar a inspeção, de tal forma que seja possível obter os dados de leitura de forma segura e precisa.

Analisando-se a Tabela 4 verifica-se que a etapa inicial está relacionada aos pré-requisitos para se realizar a inspeção utilizando a câmera termográfica integrada ao VANT, verificando a regulamentação de tais equipamentos no local onde será efetuado o procedimento, as condições climáticas, sendo necessário ventos inferiores a 7 m/s e não recomendado sua realização em dias nublados, ter conhecimento do objeto a ser estudado, como dimensões e localização, e a partir daí realizar as escolhas dos equipamentos que garantam uma autonomia de voo para tal procedimento. Posteriormente, deve-se determinar a área que o VANT estará se deslocando ao longo da inspeção, estando-se atento as áreas de riscos, tais como: fluxo de pessoas, animais e obstáculos, e estabelecendo os ângulos e as distâncias em que as leituras serão efetuadas, de tal forma que as distâncias não sejam superiores a 10 metros e que os ângulos obedeçam o que foi discutido em 3.1, assegurando a precisão dos dados obtidos. A partir daí, deve-se construir o caminho que será percorrido pelo VANT de tal forma que não haja deslocamento em áreas de riscos, e que o aparelho possua uma autonomia de voo suficiente, sendo possível concluir a trajetória com 75% de carga na bateria, visto a energia consumida nos procedimentos de pouso e decolagem. Por fim, concluída as etapas anteriores pode-se realizar a inspeção.

3.4 Análise de dados na literatura

Verificou-se que apesar da simplicidade de se utilizar o termovisor para obter termogramas durante as inspeções, se não forem levadas em consideração as interferências e as condições ambientais nas quais as imagens foram obtidas, a análise e a interpretação dos termogramas podem levar a conclusões equivocadas (Takeda e Mazer, 2018). Além disso, foi constatado que, quanto maior e mais superficial a área do defeito, a detecção é mais fácil (Rocha e Póvoas, 2017). Nesse sentido, foi constatado que se a relação R/d (R: dimensão curta do defeito e d: profundidade do defeito desde a superfície) for maior do que 1, os defeitos são encontrados; caso esta relação R/d for igual a 0,45, são detectáveis até uma profundidade de 10 centímetros (Farrag et al., 2016). Ademais, nos

perfis térmicos apresentado nos termogramas das alvenarias havia uma nítida variação na temperatura superficial. Tal diferença térmica encontrada denota a presença de diferentes materiais no interior da alvenaria, devido as propriedades físicas e químicas bastante distintas (Cortizo, 2007).

Além disso, foi verificado na inspeção de uma estrutura com revestimento cerâmico que as melhores medições foram obtidas após a fachada ter sido aquecida (técnica passiva), e que o termograma na parte da tarde teve melhor nitidez comparado com o termograma na parte da manhã (Viégas, 2015). Em um momento posterior, estudando uma edificação revestida com argamassa, constatou-se que os melhores horários para medição foram entre 11-12h e 17-18h, além de se verificar uma coloração de amarelo “mais vibrante” na região com presença de descolamento de revestimento. Isto porque, na referida região há uma elevação da temperatura com relação ao restante da fachada revestida com argamassa sem presença de manifestações patológicas. E por fim, realizando o monitoramento de uma estrutura revestida com azulejo, os melhores horários para medição foram entre 9-10h e 14-15h (Viégas, 2015). E assim, corroborando com o que foi afirmado em 3.1, no que se refere aos horários de medição.

Observou-se também uma leve tendência de haver maiores diferenças de temperatura (entre as regiões com e sem fissuras) nas áreas mais aquecidas, assim como se verificou maior dispersão dessas variações medidas para as áreas mais quentes (Freitas et al., 2014). Ademais, num primeiro momento foi considerado que pelo menos uma distância de 5 metros, entre o VANT e os objetos de pesquisa era segura. Todavia na realização dos ensaios, essa distância foi aumentada para 10 metros, garantindo tanto a veracidade dos dados obtidos, quanto a segurança da aeronave (Entrop e Vasenev, 2017). Outrossim, a realização de simulações e criação de modelos voo proporcionam uma inspeção mais precisa e um melhor rendimento por parte do VANT, visto as características de velocidade e necessidade de recarga da bateria (Freimuth e König, 2018).

4. CONCLUSÕES

Com base no que foi discutido e nos dados apresentados, é possível afirmar que a termografia integrada ao VANT se mostra como uma ferramenta capaz de identificar anomalias térmicas associadas a manifestações patológicas. Adicionalmente, verifica-se que esse mecanismo otimiza os processos de inspeção predial, permitindo a caracterização de áreas de difícil acesso, sem pôr em risco a segurança dos colaboradores, além de fornecer dados com uma maior rapidez e precisão, que auxiliarão nos ensaios de inspeção e recuperação das estruturas.

Entretanto, ficou constatado que a mesma ainda apresenta algumas limitações, sendo vulnerável a capacidade de carga do VANT, as oscilações climáticas que implicam no voo e nos dados obtidos no termograma, além das reflexões dos objetos vizinhos ao que está sendo estudado que podem interferir nos resultados. Nesse sentido, as principais contribuições do trabalho consistem em um protocolo de voo específico para o uso da câmera termográfica integrada ao VANT e uma revisão bibliográfica sobre os princípios e as técnicas envolvidas nesse procedimento, sendo uma base para estudos e pesquisas de desenvolvimento e ampliação dos modelos de monitoramento, que em paralelo com os avanços tecnológicos, tendem a superar as desvantagens e garantir a eficácia de tal ferramenta.

5. REFERÊNCIAS

- Agência nacional de aviação civil. (2017). *Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil - RBAC-E nº 94. Resolução n. 419*. Brasília.
- Agostinho, S. L. (2012), “*Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil* –

- Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização*”, Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, p. 105.
- Álvares, J., Costa, D. B., Melo, R. R. S., Bello, A. (2016), “*Estudo exploratório de mapeamento 3D de canteiros de obras utilizando veículos aéreos não tripulados*”, In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, Brasil, pp. 5067-5080.
- Andrade, R. P., Resende, M. M., Maranhão, F. L., Portella, F., Bulzico, B. (2019), “*Estado da arte da utilização da técnica de termografia embarcada em drones para inspeção de revestimentos de fachadas*”, In: 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos, São Paulo, Brasil, p.5, disponível em: <https://antaceventos.net.br/index.php/tecsic/tecsic2019/paper/view/304/139>
- Ariwoola, R. T. (2016), “*Use of Drone and Infrared Camera for a Campus Building Envelope Study*”, Master Thesis, East Tennessee State University, p. 83. <https://dc.etsu.edu/etd/3018>
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F. (2012), *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*. Applied Energy. 97(1):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15572: Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*. Rio de Janeiro.
- Barreira, E. (2004), “*Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, p. 198.
- Barreira, E., de Freitas, S. S., de Freitas, V. P., Delgado, J. M. P. Q. (2013), *Infrared thermography application in buildings diagnosis: a proposal for test procedures, industrial and technological applications of transport in porous materials*. Advanced Structured Materials. 36. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37469-2_4
- Batista, T. S. (2019), “*Avaliação do desempenho da termografia infravermelha em diferentes espessuras e profundidades de trincas em edificações*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco, p. 109.
- Bauer, E., Castro, E. K., Antunes, G. R., Leal, F. E. (2011), “*Identification and Quantification of Pathologies in Facades of New Buildings in Brasília*” in: XII DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal.
- Bauer, E., Freitas, V. P., Mustelier, N., Barreira, E., Freitas, S. (2015), *Infrared Thermography – Evaluation of the results reproducibility*. Structural Survey. 33(1): 82-86. <https://doi.org/10.1108/ss-05-2014-0021>
- Bauer, E., Pavón, E., (2015), *Termografia de infravermelho na identificação e avaliação de manifestações patológicas em edifícios*. Revista Concreto e Construções.79:93-98. ISSN:1809-7197.
- Bento, M. F. (2008), “*Unmanned aerial vehicles: an overview*”, Inside GNSS, pp. 54-61.
- Brique, S. K. (2016), “*Emprego da termografia infravermelha no diagnóstico de falhas de aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas de edifícios*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, p. 180
- Caldeira, M. M., Padaratz, I. J. (2015), *Potentialities of infrared thermography to assess damage in bonding between concrete and GFRP*. Ibracon Structures and Materials Journal. 8:296-322. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000300004>
- Cengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2012), “*Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática*” (Porto Alegre, Brasil: Amgh Editora), p. 906.
- Cerdeira, F., Vázquez, M., Collazo, J., Granada, E. (2011), *Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes*. Energy Build. 43:1845–1851. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.029>
- Chu, A-M., Westerhoff1, L., Sheppard1, S., Storey, S., Goodhew, J., Fox, M., Goodhew, S., Pahl, S., Higgins, C. (2016), “*Exploring the Use of Thermal Imagery for the Promotion of Residential*

- Energy Efficiency. Report prepared for the City of Vancouver”, available at: <http://calp2016.sites.olt.ubc.ca/files/2016/05/Thermal-Imaging-Report.pdf>
- Comitti, A. (2012), “Engenharia de manutenção: Uso da Termografia”, Revista Saber Eletrônica, 47(459):14-19.
- Cortizo, E. C. (2007), “Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 178.
- Cortizo, E. C., Barbosa, M. P., Souza, L. A. C. (2008), *Estado da Arte da Termografia*. Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. 2(2):158-193.
- Domingues, A. D. (2015), “Identificação de manifestações patológicas em fachadas prediais com revestimento cerâmico, utilizando a técnica de termografia de infravermelho”, Monografia de Graduação, Universidade Católica de Brasília, p. 29.
- Edis, E., Flores-Colen, I., de Brito, J. (2014), *Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding*. Construction and Building Materials. 51(1):187-197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.085>
- Ellenberg, A., Kontsos, A., Moon, F., Bartoli, I. (2016), *Bridge deck delamination identification from unmanned aerial vehicle infrared imagery*. Automation in Construction. 72(1):155-165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.024>
- Entrop, A. G., Vasenev, A. (2017), *Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures*. Energy Procedia. 132(1):63-68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.636>
- Farrag, S., Yehia, S., Qaddoumi, N. (2016), *Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique*, J. Bridge Eng. 21(3):1-15. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000779](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779)
- Ferreira, J. B., Lobão, V. W. N. (2018). *Manifestações patológicas na construção civil*. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas. 5(1):71-80. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/5853>
- Freimuth, H., König, M. (2018), *Planning and executing construction inspections with unmanned aerial vehicles*. Automation in Construction. 96(2):540–553. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.024>
- Freitas, J. G., Carasek, H., Cascudo, O. (2014), *Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura*. Ambiente Construído. 14(1):57-73. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100006>
- Freitas, S. S., Freitas, V. P., Barreira, E. (2014), *Detection of façade plaster detachments using infrared thermography – A nondestructive technique*. Construction and Building Materials. 70(1):80-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.094>
- Grinzato, E. (2011), “State of the art and perspective of infrared thermography applied to building science” in: Meola C, editor. Infrared thermography recent advances and future trends. Bentham Books. ISBN: 978-1-60805-521-0, <http://dx.doi.org/10.2174/97816080514341120101>
- Grinzato, E., Ludwig, N., Cadelano, G., Bertucci, M., Gargano, M., Bison, P. (2011), *Infrared Thermography For Moisture Detection: a laboratory study and in-situ test*. Materials Evaluation. 69(1):97-104.
- Harvey, M. C., Rowland, J. V., Luketina, K. M. (2016), *Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the Waikite geothermal area, New Zealand*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 325(1):61-69. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.014>
- Hiasa, S., Catbas, F., Matsumoto, M., Mitani, K. (2016), *Monitoring concrete bridge decks using*

- infrared thermography with high speed vehicles. Structural Monitoring and Maintenance*, 3(3): 277-296. <https://doi.org/10.12989/smm.2016.3.3.277>
- Infrared Training Center – ITC. (2014). *Manual do usuário – Certificação Nível 1*. Sorocaba.
- Jorge, L. A. C., Inamasu, R. Y., “*Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão*” in: A. Bernadi, J. Naime, A. Resende, L. Bassoi, Y. Inamasu (Ed.) (2014), *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, pp. 109-134.
- Kayan, H., Eslampanah, R., Yeganli, F., Askar, M. (2018), “*Heat leakage detection and surveillance using aerial thermography drone*” in: 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, Turkey, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SIU.2018.8404366>
- Labat, M., Garnier, G., Woloszyn, M., Roux, J. J. (2011), “*Infrared measurements on ventilated cladding for assessing its surface temperature and insulated part of the envelope using a simulation tool*” in: NBS 2011 – 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, pp. 315-322.
- Lavars, N. (2015), “*How drones are poised to help build the cities of tomorrow*”, acesso em 1 de julho de 2019, disponível em: <http://www.gizmag.com/drones-building-constructionindustry/36306/>
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Portalés, C. (2011), *Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building facade*. *Construction and Building Materials*. 25(1):2190-2197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.007>
- Maldague, X., Marinetti, S. (1996), *Pulse phase infrared thermography*. *Journal Applied Physics*. 79(1):2694-2698. <https://doi.org/10.1063/1.362662>
- Mavromatidis, L. E., Dauvergne, J. L., Saleri, R., Batsale, J. C. (2014), *First experiments for the diagnosis and thermophysical sampling using impulse IR thermography from Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*. *Quantitative InfraRed Thermography*. <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2014.213>
- Melo, R. R. S., Costa, D. B. (2015), “*Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para inspeção de logística em canteiros de obra*”. in: SIBRAGEC-ELAGEC, São Carlos, pp. 674-681.
- Meola, C., Carlomagno, G. (2004), *Recent advances in the use of infrared thermography*. *Measurement Science and Technology*. 15(9):27-58. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/R01>
- Mistry, B. D. (2009), “*A Handbook of Spectroscopic Data*” (Oxford, England: Oxford Book Company), p. 247.
- Muñoz, C. Q. G., Marquez, F. P. G., Lev, B., Arcos, A. (2017), *New pipe notch detection and location method for short distances employing ultrasonic guided waves*. *Acta Acustica united with Acustica*. 103(5):772-781. <https://doi.org/10.3813/AAA.919106>
- Nascimento, M. L. M. (2014), “*Utilização de drone e termografia na detecção de manifestações patológicas em edificações*”, Monografia de Graduação, Universidade Católica de Brasília, p. 21.
- O. T. Takeda, W. Mazer (2018), *Potencial da análise termográfica para avaliar manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas*. *Revista ALCONPAT*. 8(1):38-50 <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.181>
- Ocaña, S., Guerrero, I., Requena, I. (2004), *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*. *Energy Build*, 36(6):515-523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.012>
- Pajares, G. (2015), *Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 81(1):281-329. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>
- Ramírez, I. S., Marugán, A. P., Márquez, F. P. G. (2018), “*Remotely Piloted Aircraft System and Engineering Management: A Real Case Study*” in: Xu J., Cooke F., Gen M., Ahmed S. (eds) *Proceedings of the Twelfth International Conference on Management Science and Engineering Management*. Springer, Cham. pp. 1173-1185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93351-1_92
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., Jameel, M. (2016), *Nondestructive test methods for concrete*

- bridges: A review. *Construction and Building Materials*. 107(15):58-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Rocha, J. H. A., Póvoas Y. V. (2017), *Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art*. *Revista ALCONPAT*. 7(3):200-214. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Rocha, J. H. A., Santos, C. F., Oliveira, J. B., Albuquerque, L. K. S., Póvoas, Y. V. (2018), *Detecção de infiltração em áreas internas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso*. *Ambiente Construído*, 18(4): 329-340. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400308>
- Sham, J., Lo, T., Memon, S. (2012), *Verification and application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics*. *Energy Build*. 53:108–116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.018>
- Siebert, S., Teizer, J. (2014), *Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system*. *Automation in Construction*. 41:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>
- Silva, A. F. (2007), “*Manifestações patológicas em fachadas com revestimento argamassado: Estudo de caso em edifícios em Florianópolis*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, p. 190.
- Topdrone. (2020), “*DJI Mavic 2 Enterprise Dual*”, acesso em 25 de setembro de 2020, disponível em: <https://www.topdrone.com.br/dji-mavic-2-enterprise-dual/p>
- Uemoto, T. (2000), “*Maintenance of concrete structure and application of nondestructive inspection in Japan*”, in: T. Uemoto (Ed.), *Proc. Non-Destructive Testing in Civil Eng.*, ELSEVIER, 2000, Kidlington: OX (UK), pp. 1–11.
- Viana, L. A., Zambolim, L., Sousa, T. V., Tomaz, D. C. (2018), *Potencial uso de câmera termal acoplada a VANT para monitoramento de culturas*. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 12(3):286-298. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2018v12n3p286-298>
- Viégas, D. J. A. (2015), “*Utilização da termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimento*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco, p. 165.
- Watase, A., Birgul, R., Hiasa, S., Matsumoto, M., Mitani, K., Catbas, F. (2015), *Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation*. *Construction and Building Materials*. 101(1):1016-1030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.156>
- Witczuk, J., Pagacz, S., Zmarz, A., Cypel, M. (2017), *Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests - preliminary results*. *International Journal of Remote Sensing*. 39:5504-5521. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1390621>
- Yehia, S., Adudayyeh, O., Nabulsi, S., Abdelqader, I. (2007), *Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques*. *Journal of Bridge Engineering*, 12, (2):215-225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:2\(215\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215))
- Zhang, J., Jung, J., Sohn, G., Cohen, M. (2015), “*Thermal Infrared Inspection of Roof Insulation Using Unmanned Aerial Vehicles*” in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics*, Toronto, Canada, pp. 1-6. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-381-2015>