

## **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 Perdriz, **España**

#### **Director General**

Pedro Castro Borges, **México**

#### **Secretario Ejecutivo**

José Iván Escalante García, **México**

#### **Vicepresidente Técnico**

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

#### **Vicepresidente Administrativo** Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

#### **Gestor**

Paulo Helene, **Brasil**

## **Revista ALCONPAT**

### **Editor en Jefe:**

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

### **Co-Editor en Jefe:**

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

### **Editor Ejecutivo:**

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

### **Editores Asociados:**

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

Ing. Raúl Husni

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

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

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

Dr. Mauricio López.

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

Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidad Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –

INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

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

<http://www.revistaalconpat.org>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el primer número de nuestro onceavo año.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de contribuciones producto de investigación básica o aplicada relacionada directamente con la solución de problemas afines con el control de calidad, patología y recuperación de las construcciones siendo bienvenidos en estas áreas casos de estudio relacionados.

Esta edición V11N1, inicia con un trabajo proveniente de **Brasil**, donde Hygor Thairony Parreira Vilela y colegas evalúan 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.

En el segundo trabajo, Alejandro Flores-Nicolás y colegas de **México** evalúan 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.

El tercer artículo proviene de **Brasil**, donde Renata dos Santos Kimick y colegas analizan 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.

En el cuarto artículo procedente de **España**, Pedro Garcés Terradillos y colegas han 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.

El quinto artículo, de Rogerio Taygra Vasconcelos Fernandes y colegas, proviene de **Brasil**; ellos estudian 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%).

El sexto trabajo de este número lo escriben Carlos Aire y L. Aguilar de **México**, ellos 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.

En el séptimo trabajo, procedente de **Brasil**, Ramiro Daniel Ballesteros Ruiz y colegas evalúan el uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) como herramienta visual para la inspección de manifestaciones patológicas en fachadas a través de un estudio exploratorio. En la actualidad, los 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.

En el octavo trabajo, procedente de **España**, Vicente Alegre y S. Villalba discuten 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 éste 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.

El artículo que cierra la edición es de Willians Perley Alexandre da Silva y colegas de **Brasil**, quienes presentan 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 con el 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.

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de evaluaciones y caracterizaciones de materiales, elementos y estructuras. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos.

Hace exactamente 10 años, en enero de 2011, estábamos lanzando al aire el primer número de la Revista Alconpat (RAVIN1). A 10 años de distancia, debo hacer un amplio reconocimiento al cuerpo editorial original y a quienes se han ido sumando a esta iniciativa que nos ha llevado a donde estamos ahora. Pero sin duda, el mayor reconocimiento lo merecen nuestros autores de artículos,

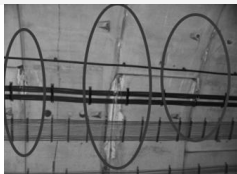
quienes han confiado en nuestra revista y han invertido tiempo, dinero y esfuerzo para publicar su trabajo de investigación con nosotros, a pesar de que muchos de ellos han tenido mejores opciones en su momento. Por último, nuestros lectores, que sin ellos no somos nadie, un especial agradecimiento por leernos, descargarnos y citarnos. Su preferencia nos dará sin duda en un lapso corto, oportunidades de seguir mejorando a través de mejores herramientas para consulta e indexación. Muchas, muchas gracias a todos. Durante 2021 festejaremos estos 10 años con algunas actividades académicas de celebración que haremos saber en cada edición

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges

Editor en Jefe



## CONTENIDO

Página

### INVESTIGACIÓN BÁSICA

- Vilela, H. T. P., Teixeira Filho, M. G., Campos Neto, T. F.:** Efectos del uso de aditivos cristalizantes en la reacción de álcali-agregado y la absorción de morteros. 1 - 17
- Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Uruchurtu-Chavarín, J.:** Efecto de la corrosión del concreto reforzado con adición de polvo de grafito y su evaluación en sus propiedades físicoeléctroquímicas. 18 – 33

### INVESTIGACIÓN APLICADA

- Kmick, R. S., Gazolla, M. G., da Silva Junior, R. M., Capraro, A. P. B., Moreira, K. A. W.:** Análisis comparativo de la efectividad y eficiencia de tres sistemas de impermeabilización. 34 – 47
- Garcés Terradillos, P., Climent, M. A., Carmona, J., Sánchez de Rojas, M. J.:** Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas. 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.:** Mapeo de manifestaciones patológicas en pavimento asfáltico por medio del uso de drones. 61 – 72
- Aire, C., Aguilar, L.:** Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX. 73 – 87
- Silva, Ruiz, R. D. B., Lordsleem Júnior, A. C., Rocha, J. H. A.:** Inspección de fachadas con Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT): estudio exploratorio. 88 – 104

### CASO DE ESTUDIO

- Alegre, V., Villalba, S.:** Avances en la instrumentación de estructuras con fibra óptica. El presente de una instrumentación con futuro. 105 – 122

### INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

- Silva, W. P. A., Lordsleem Júnior, A. C., Ruiz, R. D. B., Rocha, J. H. A.:** Inspección de manifestaciones patológicas en edificios con cámara térmica integrada en Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT): una investigación documental. 123 – 139

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

H. T. P. Vilela<sup>1\*</sup> , M. G. Teixeira Filho<sup>1</sup> , T. F. Campos Neto<sup>2</sup> 

\*Autor de Contacto: [hygorencivil@outlook.com](mailto:hygorencivil@outlook.com)

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

Recepción: 18/03/2020 | Aceptación: 23/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Vilela, H. T. P., Teixeira Filho, M. G., Campos Neto, T. F. (2021), "*Efectos del uso de aditivos cristalizantes en la reacción de álcali-agregado y la absorción de morteros*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 1 – 17, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.461>

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

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

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor H. T. P. Vilela contribuyó con las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión, redacción y preparación del texto original; M. G. Teixeira Filho contribuyó con las actividades de conceptualización, desarrollo, resultados y discusión; T. F. Campos Neto contribuyó con la conceptualización, supervisión, discusión de los resultados, redacción y revisión.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

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

### 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.

**Palabras clave:** reação álcali-agregado; aditivo cristalizante; argamassas.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, importantes avances han sido realizados en el campo de los estudios de durabilidad de los materiales de construcción. Tales investigaciones permitieron identificar el patrón de comportamiento de los materiales frente a su interacción con el medio donde están insertos, además de determinar otros aspectos fundamentales, como por ejemplo el cumplimiento del tiempo de vida útil de los proyectos y de las edificaciones.

El hormigón y el mortero se conforman como los materiales más empleados en la industria de la construcción y, entre sus diversos tipos de degradación, se puede señalar la reacción álcali-agregado (RAA). De manera general, esta es una manifestación patológica relacionada a las propiedades mineralógicas y fisicoquímicas, el resultado de la combinación de estas categorías es un efecto expansivo perjudicial. Es un fenómeno de alto grado de complejidad y, por eso, es esencial evitar su ocurrencia (Junior e Ferro, 2016).

El RAA es uno de los fenómenos patológicos que más atacan las estructuras de composición del cemento y uno de los más relevantes en cuanto a la durabilidad. En resumen, se puede definir como reacciones químicas entre algunos componentes del agregado con los hidróxidos alcalinos presentes en los poros de la matriz del cemento. Estas reacciones no tienen un tiempo preestablecido para su aparición, una vez que están vinculadas a varios factores, como, por ejemplo: la cantidad de álcali susceptible de reacción en la matriz; la temperatura y la humedad del local; la reactividad del agregado; y, por fin, la naturaleza del material, como presentado en la Figura 1 (Silva, 2007).



Figura 1. Factores determinantes para la ocurrencia y evolución de la RAA (Couto, 2008).

Es posible hacer definiciones más precisas a partir de la distinción de los diferentes tipos de la RAA. La reacción álcali-carbonato (RAC) proviene de la reacción de los hidróxidos alcalinos del cemento Portland u otras fuentes y agregados formados por rocas calcáreas dolomíticas arcillosas. Mientras tanto, la reacción álcali-sílice (RAS) se basa en la reacción de los productos de hidratación del cemento Portland y agregados con materiales silíceos en su composición (ABNT NBR 15577-1, 2018). Para esta investigación, se abordó la RAS como RAA en general.

El cemento tiene una importante influencia en la ocurrencia de esta manifestación, ya que, al hidratarse, empieza a liberar álcalis en la matriz y estos, a su vez, se vuelven accesibles a través de los poros. La RAA también puede ocurrir debido a los minerales alcalinos de los agregados, de las puzolanas existentes en la composición del cemento e incluso de los materiales presentes en el agua utilizada (Rolim, 2010).



Otro factor de gran influencia es la humedad, que a su vez puede estar relacionada con dos funciones en las reacciones deletéreas, a saber: ionizar y transportar iones alcalinos e hidroxilo por los poros de la matriz del cemento; a lo que puede ser absorbido por los productos de la RAA. De este modo, el gel de sílice alcalino se expande en presencia de agua, lo que puede provocar la aparición de grietas. Por lo tanto, para aquellos componentes del edificio que están en contacto frecuente con la humedad, se requiere una mayor prevención de la RAA (Couto, 2008).

Es conocido que la porosidad de los hormigones y morteros es un factor determinante de la resistencia química del material. Los aditivos cristalizadores, también llamados agentes curadores, son ampliamente empleados en componentes que están en constante contacto con el agua, como los depósitos de agua, red cloacal y las plantas de tratamiento de agua. Estos productos son materiales hidrófilos que reaccionan fácilmente en presencia de agua, generando una estructura cristalina a través de la cristalización del carbonato de calcio. Como consecuencia, se espera que su aplicación resulte en un incremento de la densidad del material y en una menor absorción del agua, una vez que los cristales precipitados de su reacción son insolubles. Además, proporciona un aumento de los niveles de silicato cálcico hidratado en la matriz, asegurando un mejor desempeño mecánico de los materiales cementosos (Roig-Flores et al., 2015).

Dado lo anterior, este artículo tiene como objetivo evaluar la eficacia del uso de diferentes niveles del aditivo cristalizador a fin de prevenir la reacción álcali-agregado en morteros. Este análisis se realizó mediante ensayos de absorción por capilaridad y porosidad, determinación de la expansión de las barras de mortero por el método acelerado y desempeño mecánico de las muestras.

## 2. MATERIALES

### 2.1. Cemento

Se utilizó cemento CPV-ARI, por su pureza, evitando cualquier tipo de cambio en el resultado de la reactividad del agregado. Es uno de los cementos más propensos a la aparición de la RAA, debido a su menor grado de escoria y finura en los compuestos. Las propiedades físicas del cemento empleado se presentan en la Tabla 1, cumpliendo con las especificaciones de NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabla 1. Resultados de los ensayos de caracterización física del cemento Portland.

Características del ensayo	Norma de referencia	Especificación de norma	Resultado	Unidad de medida
Residuo en el tamiz #200	ABNT NBR 11579:2012	$\leq 6,0$	5,4	%
Masa específica	ABNT NBR 16605:2017	No se aplica	3,0	g/cm <sup>3</sup>

### 2.2. Agregado menudo

Los agregados menudos se utilizaron de acuerdo con la referencia de la Tabla 2, teniendo en cuenta las cantidades ideales de cada fracción. Para poder cumplir con esta relación, fue necesario utilizar dos agregados menudos distintos, que se encuentran en un radio de aproximadamente 170 km de Rio Verde - GO.

Tabla 2. Granulometría requerida del material para ensayo de la RAA.

Tamiz con abertura de la malla (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Cantidad de material en masa	
Pasante	Retenido	%	G
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 $\mu\text{m}$	25	247,5
600 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	25	247,5
300 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	15	148,5

ABNT NBR 15577-4 (2018)

Para garantizar el cumplimiento de los datos de la Tabla 2, se realizaron pruebas de masa específica, masa unitaria y granulometría de acuerdo con ABNT NBR NM 52: 2003, ABNT NBR NM 45: 2006 y ABNT NBR NM 248: 2009, respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de caracterización del agregado menudo.

Agregado	Masa específica	Masa unitaria	Módulo de finura
Arena fina	2.630 kg/m <sup>3</sup>	1.513 kg/m <sup>3</sup>	1.42
Arena gruesa	2.621 kg/m <sup>3</sup>	1.579 kg/m <sup>3</sup>	2.54

### 2.3. Aditivo

El contenido del aditivo cristalizador se definió de acuerdo con la masa de cemento de los morteros, teniendo en cuenta los niveles de 0,8% a 1,2% indicados por el fabricante. Cardesa y Zephir (2014) utilizaron niveles de 0,8%, 2,0% y 3,0% y Takagi, Lima y Helene (2012) usaron 2,5%. Ambos grupos de investigadores obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la cristalización e impermeabilización de las mezclas, por lo que para esta investigación se adoptaron los niveles de 1% y 2%. Las tablas 4 y 5 traen los datos del aditivo informados por el propio fabricante.

Tabla 4. Características del aditivo cristalizador.

Característica	Valores Correspondientes	Unidades de medida
PH	10 – 13	%
Punto de fusión	1000	°C
Aspecto Masa específica	Sólido en polvo gris 1,1	- g/cm <sup>3</sup>
Olor y límite de olor	Característico del cemento	-

Penetron Admix (2018)

Tabla 5. Composición química del aditivo.

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

\*Secreto Industrial – El porcentaje exacto (concentración) de la composición fue retenido como secreto industrial.

Penetron Admix (2018)

### 3. MÉTODOS

El método de investigación siguió el flujograma enseñado en la Figura 2. Todos los pasos descritos a continuación están destinados a cumplir con los requisitos de NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

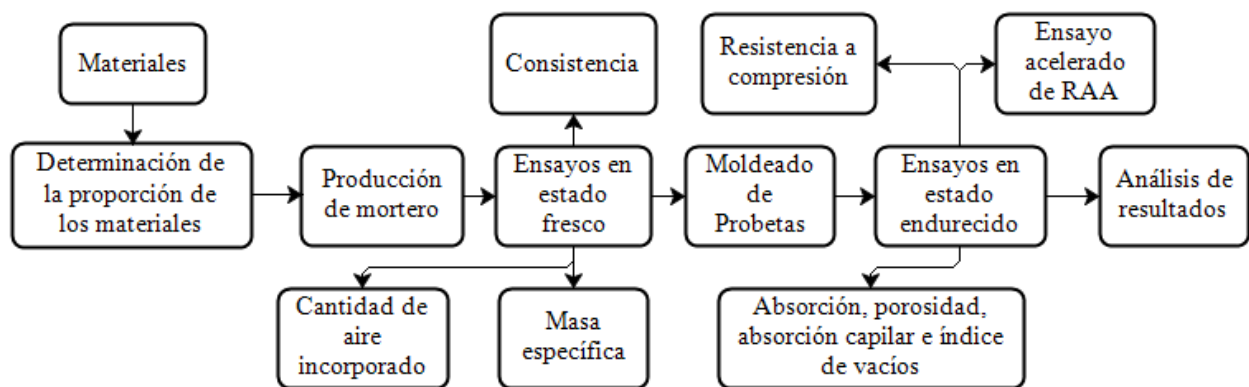


Figura 2. Estructura metodológica de investigación.

#### 3.1. Determinación de la proporción de los materiales

Para determinar la expansión del mortero a través del método acelerado, la proporción de los materiales establecida fue una parte de cemento, 2.25 partes de agregado y una relación de agua/cemento (a/c) de 0.47. Para el moldeo de las tres barras de mortero, cuya masa específica del agregado (d) sea mayor o igual a  $2.45 \text{ g/cm}^3$ , se deberán adoptar las fracciones de 440 gramos de cemento y 990 gramos de agregado.

Los ensayos se realizaron según la Figura 2 y la composición fue definida según la Tabla 6, con una mezcla de referencia (AR) sin aditivo y dos mezclas (AA1 y AA2) con contenidos de 1% y 2% de aditivo cristalizador. Durante la producción de las mezclas, el aditivo se diluyó previamente en el agua de amasado, de acuerdo a lo especificado por el fabricante.

Tabla 6. Composición unitaria de los morteros analizados.

Composición	Cemento	Arena	Agua	Aditivo Cristalizador
AR	1	2,25	0,47	-
AA1	1	2,25	0,47	0,01
AA2	1	2,25	0,47	0,02

### 3.2. Ensayos en estado fresco

Los ensayos de masa específica y cantidad de aire incorporado de los morteros se realizaron según NBR 13278 (ABNT, 2005). Para la determinación de la cantidad de aire incorporado fueron empleados los resultados de la masa específica obtenidos a través de la relación de las masas teóricas y estimadas.

La consistencia de las mezclas fue analizada dentro de las recomendaciones de NBR 13276 (ABNT, 2016).

### 3.3. Moldeado de probetas y curado

Las probetas cilíndricas y las probetas prismáticas se moldearon de acuerdo con NBR 7215 (ABNT, 2019) y NBR 13729 (ABNT, 2005), respectivamente. Las probetas prismáticas con dimensiones de 30x25x285mm para evaluación de la expansión fueron moldeadas según NBR 15577-4 (ABNT, 2018), en dos capas densificadas con 20 golpes en cada una.

Para el ensayo acelerado de RAA, se requieren al menos tres barras de mortero por cada agregado utilizado. Las barras se curaron en cámara húmeda a 23 ° C, por un período de 24 horas, protegidas de los chorreos. Pasado este período, se sacaron los morteros de los moldes y se colocaron en un baño termostático con la solución de hidróxido de sodio. Este último paso es parte integrante del procedimiento de ensayo en estado endurecido.

### 3.4. Ensayos en estado endurecido

Según lo establecido en NBR 15577-4 (ABNT, 2018), los moldes de mortero pasaron por un período de 30 días sumergidos en solución de NaOH (hidróxido de sodio - 1.0 N), presentado en la Figura 3. Durante este período, se realizaron ocho lecturas de las dimensiones de las probetas, siendo una obligatoria a los 16 días y la otra a los 30 días después del moldeo.

La prueba de resistencia a la compresión se realizó con probetas cilíndricas según el procedimiento establecido en NBR 7215 (ABNT, 2019) y la prueba de resistencia a la flexión y tracción se realizó según NBR 13279 (ABNT, 2005), empleándose las probetas prismáticas, ambas en prensa hidráulica, registradas en la Figura 4.

Los ensayos de absorción capilar, en gramos por centímetro cuadrado, y los índices de vacío y absorción por porosidad, ambos en porcentaje, se realizaron de acuerdo con NBR 15259 (ABNT, 2005) y NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente. Estos ensayos se llevaron a cabo con el objetivo de evaluar el efecto cristalizador del aditivo y relacionarlo con el posible retraso de RAA en morteros.



Figura 3. Probetas de mortero sumergidas en solución de NaOH para el cumplimiento de los ensayos de expansión.

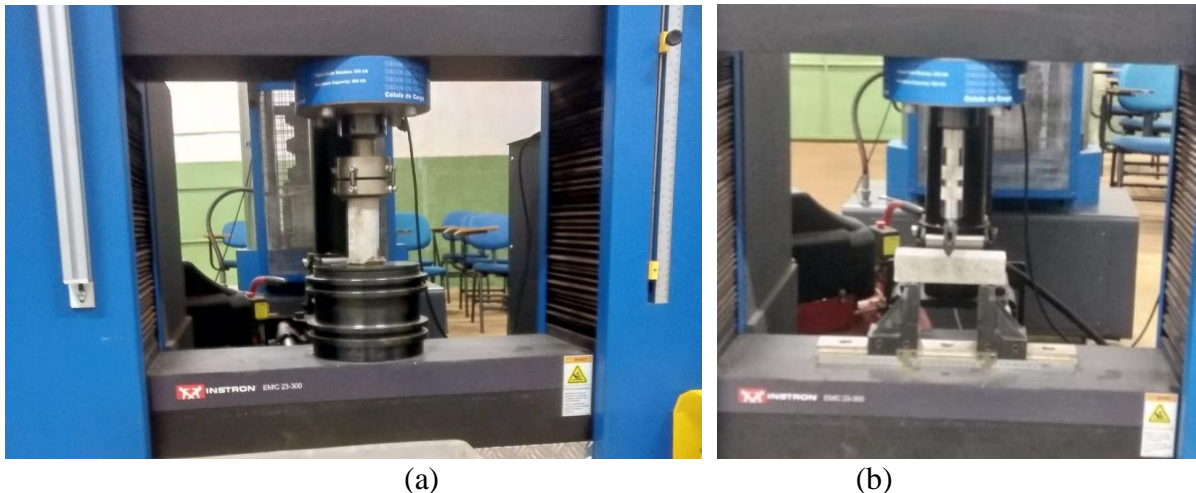


Figura 4. Registros fotográficos de los ensayos de resistencia a la compresión (a) y resistencia a la flexión y tracción (b) a los 28 días de las probetas de mortero.

### 3.5. Análisis de los resultados

Todos los datos pertinentes al ensayo acelerado de la RAA fueron analizados y comparados siguiendo las tablas proporcionadas por NBR 15577-1 (ABNT, 2018), en las cuales se determina la reactividad potencial del agregado, el grado de riesgo de ocurrencia, las consecuencias y la clasificación de reactividad. (Figura 5). Los demás ensayos mencionados anteriormente fueron ejecutados con el propósito de ampliar y complementar el enfoque de los efectos del aditivo sobre su desempeño y comportamiento de los morteros.

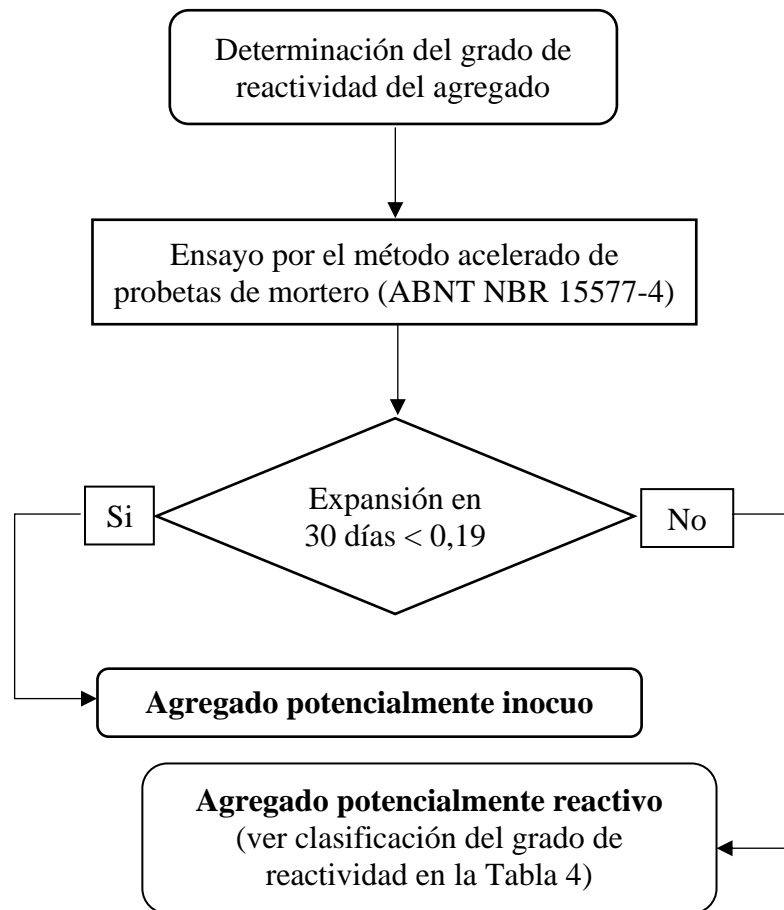


Figura 5. Procedimiento para determinación del grado de reactividad del agregado según lo establecido en NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Ensayos en estado fresco

La Tabla 7 presenta los resultados de los ensayos realizados con las mezclas en estado fresco. Es posible notar que el aditivo curador tiene efectos sobre el mortero en estado fresco, en lo cual a medida que se incrementa la cantidad de aditivo, aumentan la masa específica y el esparcimiento, así como los niveles de aire incorporado son reducidos.

Tabla 7. Resultados de masa específica, esparcimiento y niveles de aire incorporado de los morteros analizados en estado fresco.

Composición	Masa específica	Esparcimiennto	Nivel de aire incorporado
AR	2216.87 kg/m <sup>3</sup>	267 mm	1.05 %
AA1	2226.51 kg/m <sup>3</sup>	278 mm	0.34 %
AA2	2228.92 kg/m <sup>3</sup>	283 mm	0.09 %

Las mezclas registraron incrementos no expresivos de masa específica, lo que, a su vez, se explica por la finura del aditivo utilizado. Los granos más finos del aditivo llenan los huecos intersticiales y aumentan la cohesión de las mezclas hasta en un 0,5%.

Aunque el aditivo es muy similar al cemento, el esparcimiento no ha disminuido, al contrario, se ha observado un aumento de la fluidez. Esto se debe a los diferentes productos químicos presentes en la mezcla, que pueden actuar como plastificante reductor de agua. Este aumento en el esparcimiento indica que el aditivo puede reducir la relación agua/cemento para una cierta consistencia, como también encontraron Cardesa y Zephir (2014). Algunos investigadores, como Moreira (2016) y Takagi, Lima y Helene (2012) identificaron una pérdida de consistencia con el uso de aditivos similares, pero no el mismo producto de esta investigación. Los fabricantes pueden utilizar diferentes productos químicos en la producción de aditivos cristalizadores y, en el caso del producto estudiado en este artículo, se observó una mejora en la consistencia.

En cuanto al nivel de aire incorporado, así como en la masa específica, la finura del material es responsable por reducir la cantidad de aire con un aumento de la cantidad de aditivo en la mezcla. Esta disminución en estado fresco puede contribuir a reducciones en el índice de vacío, capilaridad y porosidad de las mezclas endurecidas.

#### 4.2. Ensayos en estado endurecido

Como resultado se obtuvieron los datos presentados en las Figuras 6 a 13. La Figura 6 enseña los resultados en cuanto a la resistencia a la compresión de los morteros testeados. Se nota que a medida que aumenta el contenido de aditivo, también aumenta la resistencia a la compresión, ya que la mezcla AA2 es la que obtuvo el mejor desempeño, seguida por AA1 y AR, respectivamente.

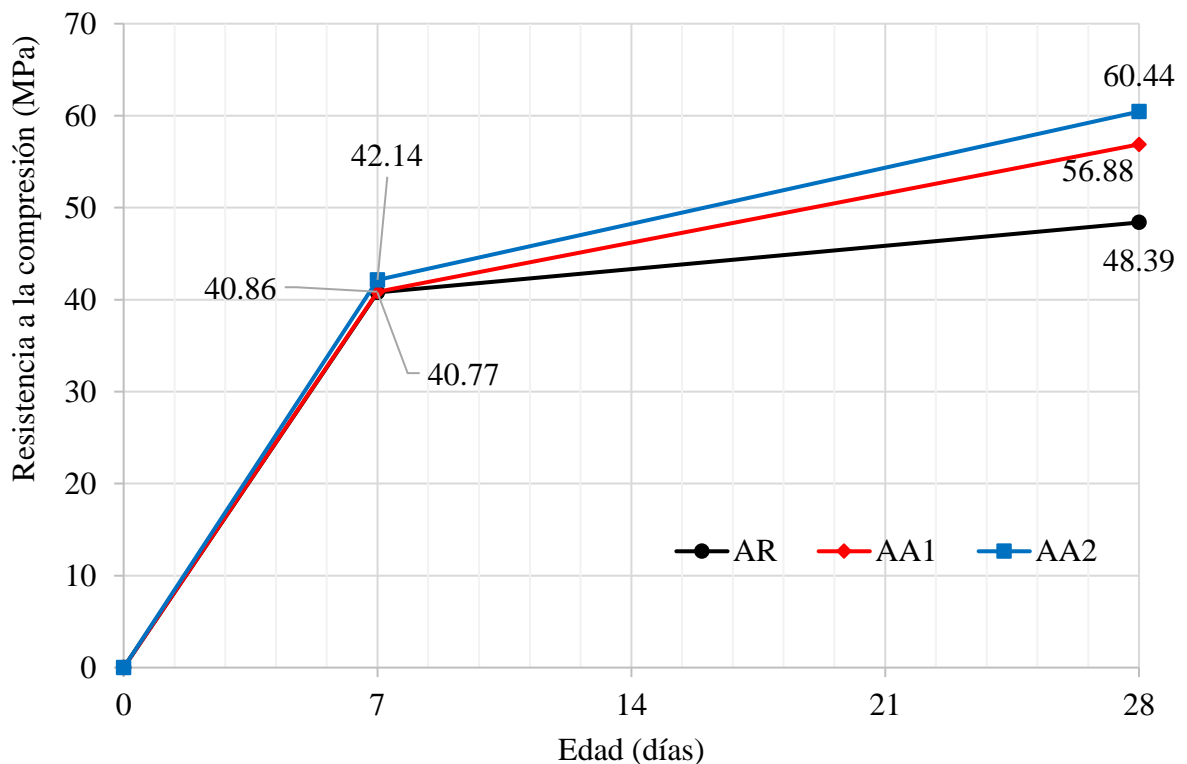


Figura 6. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión (MPa) de los morteros a los 7 y 28 días.

Este comportamiento es similar al observado por Takagi, Lima y Helene (2012); Cardesa y Zephir (2014); y García-Vera, Tenza-Abril, Saval y Lanzón (2019). En todas las investigaciones se encontró que, con niveles iguales o superiores al 1% de aditivos cristalizadores bajo la masa de cemento, la resistencia a la compresión en hormigones y morteros aumenta en comparación con

mezclas sin aditivos.

A los siete días es posible observar una aproximación de los resultados de resistencia de las tres mezclas. Esto se debe al poco tiempo transcurrido desde la producción de los morteros para la reacción del aditivo, ya que su reactividad depende de las reacciones de hidratación del cemento. Sin embargo, a los 28 días, el incremento de resistencia de las mezclas con aditivo en relación a la mezcla de referencia ya es notorio. El mortero AA2 logró una resistencia de 24,9% superior al AR, mientras que el AA1 alcanzó un valor en torno al 17,5% superior al AR. Como no se modificó ninguna información entre las mezclas que no sea el uso del aditivo, el aumento de resistencia se debe a su uso.

La Figura 7 exhibe los resultados relacionados con los ensayos de resistencia a la flexión y tracción, donde además de la resistencia a la compresión, también se verificó el incremento de rendimiento con el uso del producto cristalizador. Nuevamente, la mezcla AA2 logró el mejor resultado, alcanzando un valor aproximadamente 12,8% superior al AR, mientras que AA1 presentó una resistencia 11,3% superior a la referencia.

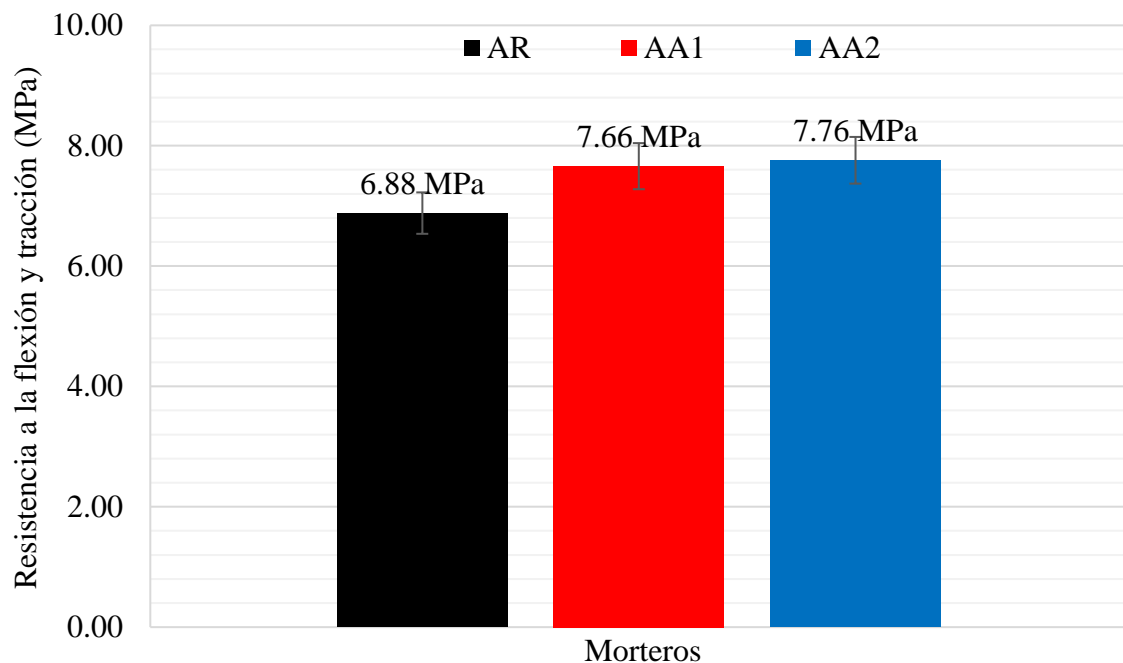


Figura 7. Resultados de los ensayos de resistencia a la flexión y tracción (MPa) de los morteros a los 28 días.

El aumento de la resistencia a la flexión y tracción de los morteros con aditivo se explica por la acción cristalizadora del producto, que se traduce en áreas más grandes de sección transversal maciza, aumentando así la capacidad portante del material. Este incremento de resistencia a la tracción, aunque no expresiva, también fue observada por Moreira (2016) en mezclas con 0,8% de aditivo cristalizador.

Según el fabricante del aditivo, el material es capaz de rellenar grietas y huecos de hasta 0,5 mm. La Figura 8 registra imágenes microscópicas con un zoom de aumento de 35x de las secciones transversales de las probetas sin (Figura 8a) y con aditivo (Figura 8b). En la Figura 8b, es posible ver una porción de material con un color diferente al estándar sin aditivo, lo que permite potenciar el poder curativo del químico.



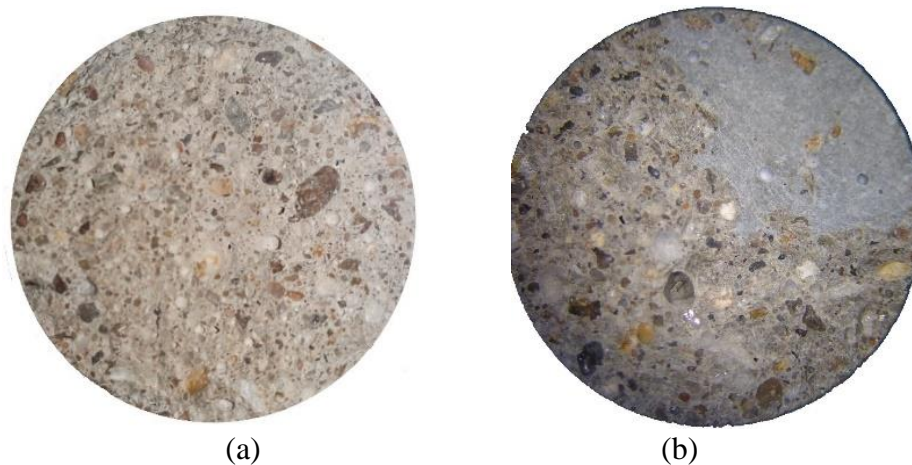


Figura 8. Imagen microscópica del corte transversal de la probeta sin aditivo (a) y con aditivo al 2% (b), ambos tras la rotura a los 28 días. Imágenes con zoom de aumento de 35x.

Teniendo en cuenta que la probeta presenta algunas irregularidades internas, posiblemente provocadas durante su elaboración, el aditivo reaccionó y terminó por llenar los pequeños huecos del interior de las probetas. Su distribución fue homogénea, sin embargo, la cristalización ocurre exclusivamente en los vacíos de la masa y, por esta razón, en la Figura 8 se formó una región resultante de la acción del aditivo. En el área “curada” no se encuentran concentraciones de agregado menudo, lo que, de acuerdo con los datos presentados por el Japan Concrete Institute en JCI-TC075B (2009), corroboran la idea del efecto cristalizador.

Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados obtenidos a través del ensayo de absorción de agua por porosidad y los índices de vacíos realizados de acuerdo con los requisitos de NBR 9778 (ABNT, 2005). Se observa que la presencia del aditivo curador reduce tanto la absorción de agua por porosidad como el índice de vacío de las mezclas.

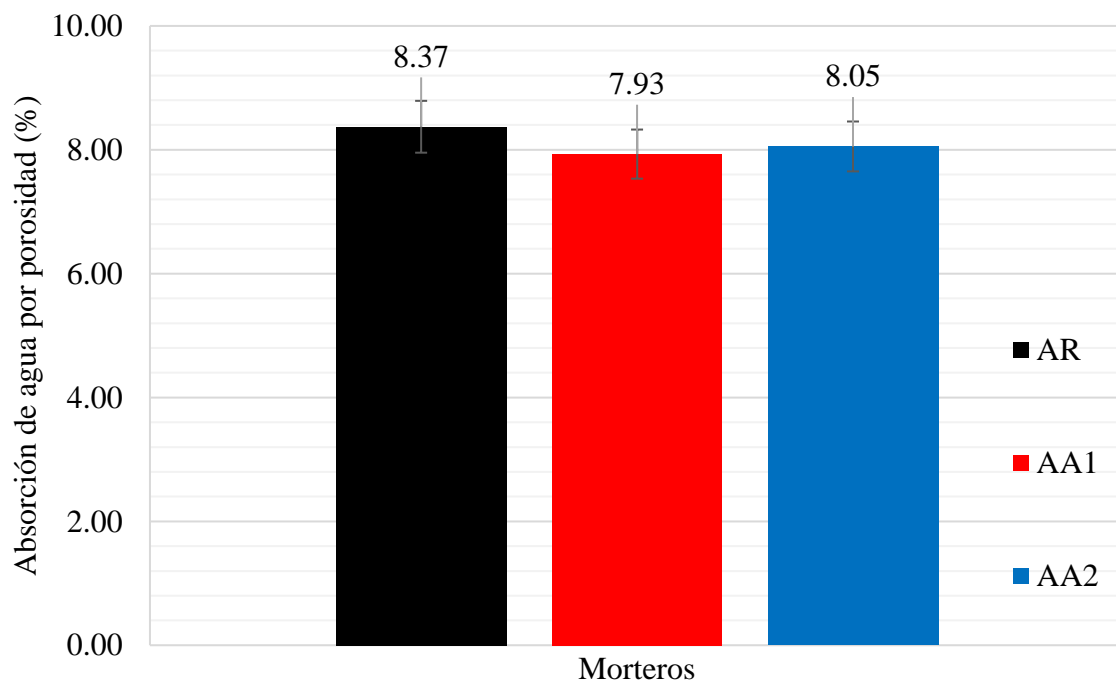


Figura 9. Resultados de los ensayos de absorción de agua por porosidad o absorción de agua bajo presión (%) en probetas de morteros sumergidos en agua a los 28 días.

Este ensayo, al ser realizado con probetas bajo presión, identifica la porosidad abierta y cerrada y el índice de vacíos totales de los morteros. Se observa que la mezcla con un contenido del 1% alcanzó los mejores resultados, corroborando que el rango de contenidos indicado por el fabricante es adecuado. Al aumentar la cantidad de aditivo a un valor superior al rango indicado, se observa un nuevo aumento tanto en la porosidad como en el índice de vacíos. Sin embargo, aunque los resultados de los morteros con aditivos son mejores que la mezcla de referencia, la diferencia entre ellos no es significativa, con la mayor reducción de porosidad e índice de huecos en torno al 5,3%.

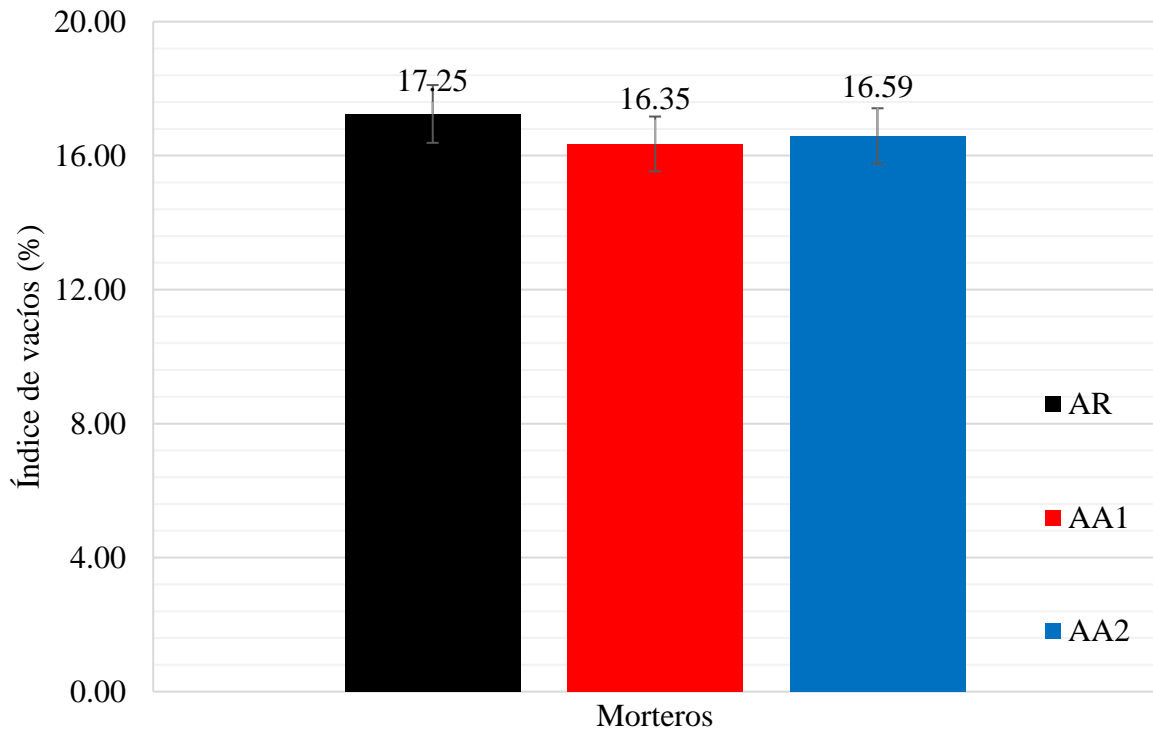


Figura 10. Resultados de los ensayos de índice de vacíos (%) obtenidos con probetas de mortero sumergidas en agua a los 28 días.

Las Figuras 11 y 12 muestran los resultados obtenidos en las pruebas para determinar el coeficiente de absorción y capilaridad realizadas según NBR 15259 (ABNT, 2005). La absorción por capilaridad se define por el área de la sección transversal en contacto constante con el agua y que se mide en gramos por centímetro cuadrado. Es visible que la adición del aditivo curador en niveles superiores al 1% reduce considerablemente la absorción por capilaridad de los morteros.

Los valores de capilaridad, dado el resultado presentado en la Figura 11, pueden reducirse en aproximadamente un 20%, atestiguando, nuevamente, el poder de sellado del aditivo. Resultados similares fueron presentados por Takagi, Lima y Helene (2012) y Pazderka y Hájková (2016), ambos con niveles del 2%.

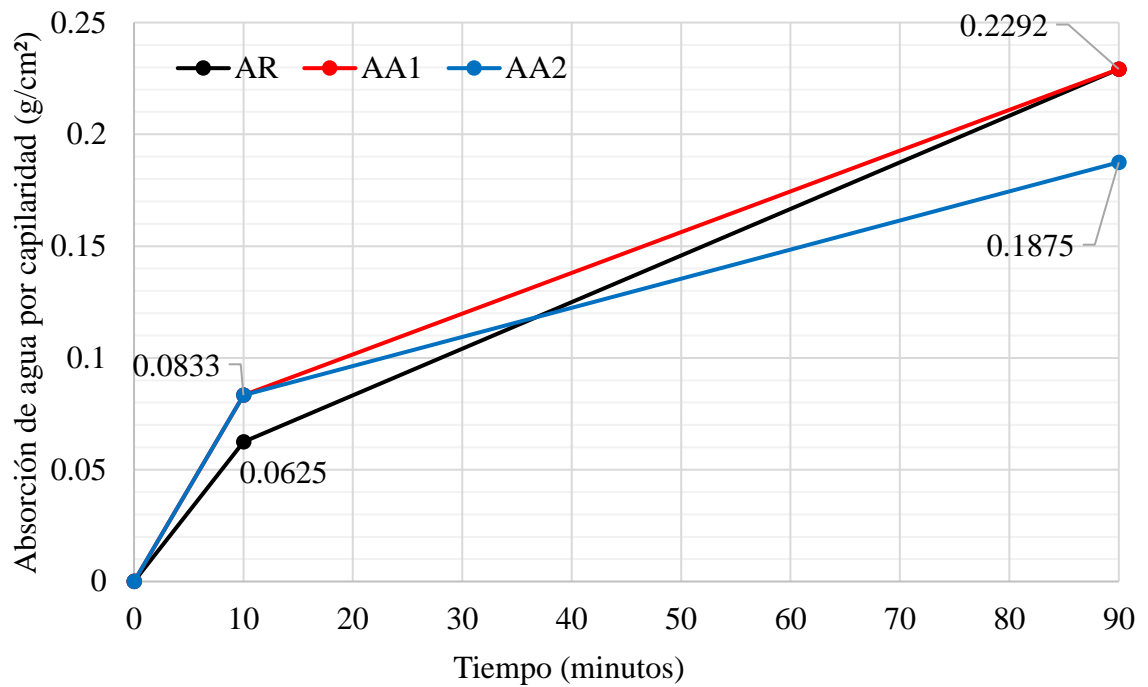


Figura 11. Resultados de los ensayos de absorción de agua por capilaridad (%) de la probeta de mortero en contacto con una capa de agua a nivel constante de 5mm.

El coeficiente de capilaridad se refiere al coeficiente angular de una línea recta que pasa por los puntos representativos de las lecturas tomadas a los 10 y 90 minutos, siendo calculada restando las masas registradas en estas determinaciones.

Se observa que cuanto mayor sea la cantidad de aditivo empleado en la mezcla, menor será el coeficiente de capilaridad y, por lo tanto, menor será la absorción por capilaridad en una fracción de tiempo. Al igual que en los datos inmediatamente anteriores, la mezcla AA2 presentó el mejor resultado, alcanzando un coeficiente aproximadamente un 37,5% menor que el AR, mientras que AA1 logró una reducción del 12,7% con relación al AR.

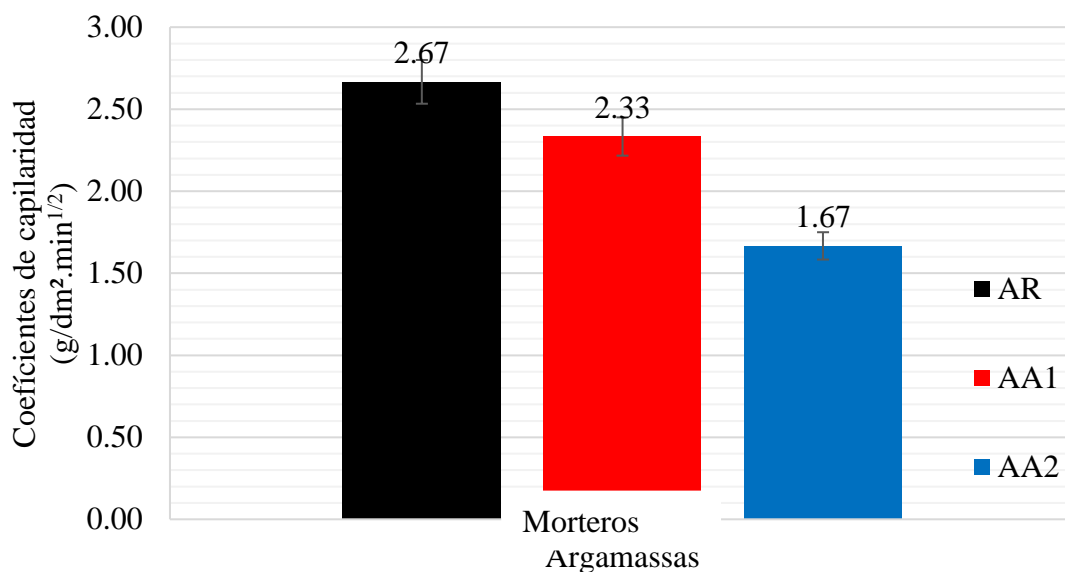


Figura 12. Coeficientes de capilaridad (g/dm²·min<sup>1/2</sup>) de los morteros, determinados a partir de lecturas tomadas a los 10 y 90 minutos de ensayo.

La Figura 13 presenta los resultados respecto a las determinaciones de las expansiones realizadas en las probetas durante los ensayos acelerados de RAA en morteros según NBR 15577-4 (ABNT, 2018). De antemano se aprecia una alta expansión inicial, a los 6 días, en morteros con aditivo cristalizador.

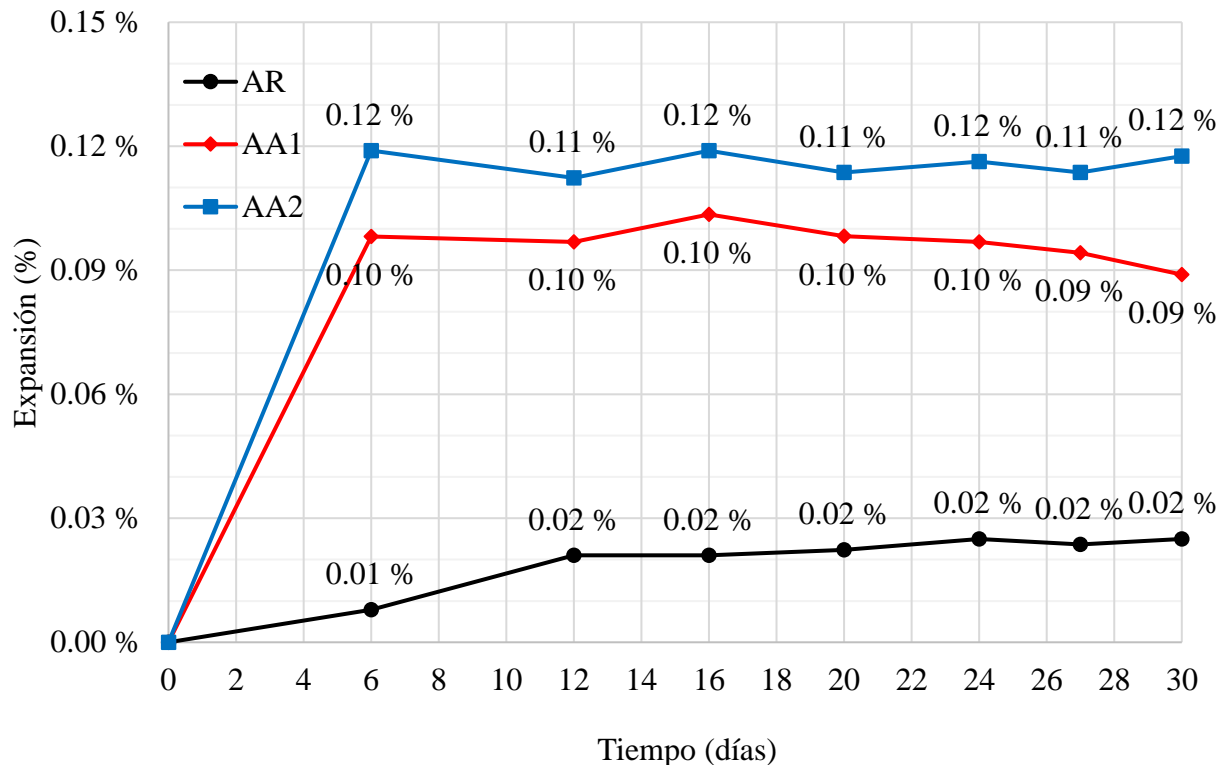


Figura 13. Expansión (%) de las probetas durante los ensayos acelerados de RAA en morteros registrados por un período de 30 días corridos posteriores al moldeo.

Este resultado señala que los productos alcalinos presentes en la composición del aditivo, descrita en la Tabla 5, pueden haber colaborado para la evolución de las expansiones en la primera semana, considerando que es evidente que la evolución volumétrica inicial crece a medida que el contenido de aditivo también aumenta.

Las diferencias entre las variaciones del mortero son significativas, donde AA2 mostró una expansión inicial, a los 6 días, aproximadamente 1100% mayor que AR, mientras que AA1 registró una variación alrededor de 900% mayor que AR. Sin embargo, transcurrido este período de 6 días, la evolución de las expansiones cesa y las dimensiones de las probetas se estabilizan y, en consecuencia, estos porcentajes disminuyen en función del tiempo y descienden al 500% y 350%, respectivamente.

Las expansiones fueron claramente causadas por el aditivo, ya que el mortero AR mostró valores mucho más bajos. Analizando la composición química del aditivo, se puede señalar que las reacciones pueden haber sido provocadas por el magnesio de su composición, sin embargo para mejores determinaciones es necesario realizar investigaciones con enfoque micro estructural.

Independientemente, se cree que el aditivo tiene un tiempo de activación de aproximadamente una semana, iniciando el sellado de los huecos y poros y controlando las variaciones volumétricas de los morteros desde el momento de estabilización de la expansión.

Es importante señalar que estas lecturas se registraron en muestras prismáticas de mortero de pequeño tamaño. Si se aplica a gran escala, el uso de este aditivo puede requerir cierta atención a

los límites establecidos por los fabricantes, para evitar mayores inconvenientes.

Está indicado el uso de productos que inhiban las reacciones álcali-agregado, como los materiales puzolánicos. Estos materiales cohíben las dilataciones iniciales y evitarán la ocurrencia de daños en los componentes del hormigón o mortero en edades tempranas, permitiendo que el aditivo tenga todos sus elementos constituyentes destinados a sellar los poros y vacíos. Sin embargo, el análisis del comportamiento del aditivo junto con materiales puzolánicos, como la sílice activada, debe estudiarse y permanece como sugerencia para futuras investigaciones.

En suma, en cuanto a la clasificación de la reactividad potencial del agregado, considerando los límites establecidos en la NBR 15577-1 (ABNT, 2018), el material resultó ser potencialmente inocuo grado R0, es decir, la expansión de las barras de mortero a 30 días fue inferior al 0,19%. Si bien las diferencias entre las expansiones de mortero son elevadas, el grado de riesgo relacionado con esta clasificación es insignificante y no se hace necesaria ninguna acción de mitigación debida a la RAA, en función del agregado utilizado.

## 5. CONCLUSIÓN

Se puede concluir que el aditivo cristalizador utilizado en esta investigación, con respecto a la inhibición de la reacción álcali-agregado no cooperó en los primeros días. Por el contrario, la presencia de productos alcalinos en su composición incrementó el porcentaje de expansiones iniciales hasta el momento en que el aditivo reaccionó con los productos de hidratación del cemento. Frente a esto, el uso de materiales inhibidores de RAA, como las puzolanas, está indicado en paralelo con aditivos curadores de composición química similar.

Sin embargo, su uso resultó ser bastante satisfactorio cuando se trata de desempeño mecánico, absorción de agua e índice de vacíos en niveles de 1% y 2% de aditivo. El empleo del aditivo resultó en un incremento de la resistencia a la compresión, flexión y tracción, además de una reducción del índice de vacíos y la absorción por porosidad. Sin embargo, su mayor activo radica en la importante reducción del coeficiente y absorción por capilaridad, presentándose como un producto indicado para elementos que están en constante contacto con el agua, como embalses y sistemas de saneamiento básico.

## 6. REFERENCIAS

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”.

## Efecto de la corrosión del concreto reforzado con adición de polvo de grafito y su evaluación en sus propiedades físicoquímicas

A. Flores-Nicolás<sup>1</sup> , M. Flores-Nicolás<sup>1</sup> , J. Uruchurtu-Chavarín<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [juch25@uaem.mx](mailto:juch25@uaem.mx)

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

Recepción: 28/07/2020 | Aceptación: 06/11/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**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 físicoquímicas*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 18 – 33, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

<sup>1</sup> 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.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo el autor A. Flores-Nicolás contribuyó con la idea original, recolección de datos, metodología experimental, discusión de resultados y la redacción del trabajo. El autor M. Flores-Nicolás contribuyó con la coordinación de los experimentos, redacción y revisión del trabajo. El autor J. Uruchurtu-Chavarín contribuyó con la coordinación en general del trabajo, revisión, orientación al autor y supervisión de las actividades.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

## **Efeito na corrosão do concreto reforçado com adição de pó de grafite e sua avaliação nas propriedades físico-electroquímicas.**

### **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 aumentou.

**Palavras-chave:** concreto reforçado; grafite; corrosão; cloretos.

### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.



## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción en la gran mayoría en obras civiles, se ha transformado en una de las estructuras más resistentes por sus propiedades mecánicas. Numerosas investigaciones, han estudiado la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado porque exige una alta tecnología por las necesidades que tiene de conservación y mantenimiento (Vidaud y Vidaud, 2012). La corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas de durabilidad del concreto. Este fenómeno se ve afectado por el tipo de ambiente al que se está expuesto, dañando la estructura a lo largo del tiempo. Necesariamente, la pasta de concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza al acero embebido, primero proporciona una barrera física que lo aísla del medio ambiente, y segundo el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que lo pasiva de forma duradera (González y Jimmy, 2003). Estas propiedades se ven afectadas, por lo que utilizar nuevos materiales en la pasta de concreto es importante para mejorar sus propiedades físicas y extender la durabilidad de las estructuras de concreto.

Actualmente, el uso de compuestos a base de cemento con partículas de carbono y otras adiciones, son nuevos materiales compuestos con excelentes propiedades físicas y químicas que los hacen adecuado para ser utilizado en productos tecnológicamente avanzados (Chung, 2000). Los principales materiales de carbono agregados al concreto incluyen: fibras de carbono, escamas de grafito, polvo de grafito o nanotubos de carbono; en esta investigación se ha dirigido a la utilización de polvo de grafito. El grafito es una forma alotrópica del elemento carbono, consistente en láminas de átomos de carbono (grafenos) que forman un sistema de anillos condensado plano. Existen dos formas posibles de apilamiento de los grafenos: la hexagonal tipo Bernal (ABAB) y la romboédrica (ABCABC); la estructura denominada “hexagonal simple” (Tascón, 2007).

(Heymsfield et. al., 2013) incorporó este elemento en la pasta de concreto e informó que la absorción de polvo de grafito disminuyó a medida que aumentó el tamaño del agregado de polvo de grafito, en consecuencia, la resistencia del diseño de la mezcla aumentó a medida que aumentaba el tamaño del agregado de polvo de grafito. Además, indica que el contenido de grafito podría mejorar principalmente las propiedades de conductividad térmica y reducir la capacidad calorífica específica (Wu et. al., 2014).

(Yuan et. al., 2012) estudiaron el grafito molido expandido (G) con alta temperatura y reportó que la resistencia a la compresión disminuye con la adición de grafito y el aumento de relación a/c, mientras que la conductividad térmica y el volumen de la capacidad calorífica aumenta con la adición de grafito. En las pruebas de propiedades electroquímicas se muestra que ocurre una disminución en el nivel de corrosión cuando se incrementa la relación de adición de material de carbono (Garcés et. al., 2007).

(Ha et. al., 2005) investigaron acerca de la corrosión del acero de refuerzo incrustadas en el cemento portland ordinario, reportó corrosión severa cuando el nivel de carbono y la ceniza volante se incrementó; la condición de humectación y secado con cloruro de sodio NaCl al 3% fue encontrado entre 6% y 8% de carbono mezclado con ceniza volante.

En este tema de investigación, presenta un estudio sobre el comportamiento de la corrosión del concreto reforzado, con adición de polvo de grafito como sustituto parcial del peso del cemento y el análisis en sus propiedades fisicoquímicas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Elaboración de probetas

Las mezclas de concreto se prepararon empleando el método de diseño (ACI. 211.1-91, 2002), una resistencia de diseño teórico de  $250 \text{ kg/cm}^2$  después de 28 días de curado y un asentamiento de  $12 \pm 2 \text{ cm}$ ; utilizando cemento Portland CPC 30 R (ASTM C- 150, 2020), como agregado fino se utilizó arena de río con un tamaño máximo nominal de 4.75 mm y agregado grueso de piedra triturada tamaño máximo de 19 mm. Se usó acero de refuerzo corrugado convencional n.º1018, se utilizó una lija para la limpieza previa. El polvo de grafito (GP) se añadió en los siguientes porcentajes: 0% (control), 2.5%, 7.5% y 15% respecto al peso del cemento. La Tabla 1 muestra las características principales del GP.

Tabla 1. Características del GP utilizado

Material	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	Humedad (%)	Dureza (Mohs)
GP	63	2.22	2.5	1-2

La dosificación de los materiales utilizados en este trabajo se menciona en la Tabla 2, no se modificó el peso de los agregados finos y gruesos, además no se utilizó ningún aditivo en la mezcla de concreto. Las muestras M3 y M4 con cantidad de grafito de 7.5% y 15% en peso del cemento, se agregó mayor cantidad de agua, porque la pasta era poco trabajable y esto mantuvo el rango de asentamiento de  $12 \text{ cm} \pm 2$  para los 4 diseños de mezcla.

Tabla 2. Proporción del diseño de mezcla para  $1 \text{ m}^3$ .

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

La elaboración de las muestras de concreto se realizó de acuerdo a la norma (ASTM C-31, 2019). Para las pruebas electroquímicas se elaboraron 3 espécimen cúbicos de dimensiones 10 cm por lado con el mismo diseño de mezcla, como se observa en la Figura 1. Se embebieron 3 varillas corrugadas en cada probeta cúbica, de dimensión 0.95 mm de diámetro. La longitud de la varilla embebida fue de 5.5 cm. En la altura de la interfaz de la pasta con el medio ambiente, la varilla se aisló aproximadamente de 5 cm de largo con cinta de teflón alrededor de la barra.

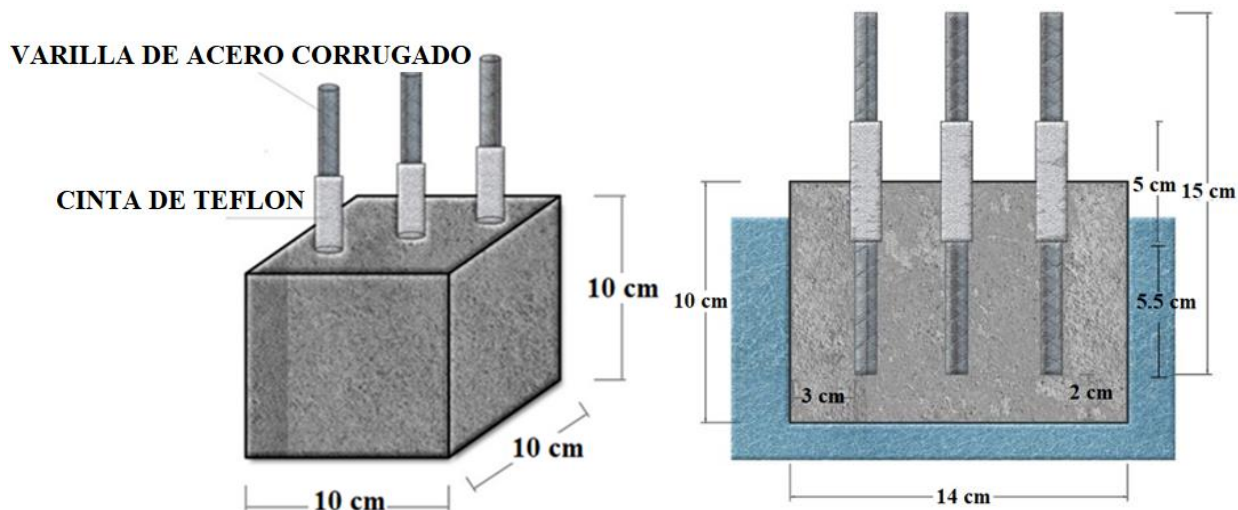


Figura 1. Dimensiones cúbicas de las probetas de concreto.

Los especímenes se curaron durante 28 días, en condiciones adecuadas de humedad. Las mediciones electroquímicas empezaron 24 horas después de que las probetas cúbicas se sumergieron en una solución salina al 3% de cloruro de sodio, durante 168 días de exposición.

### 2.1.1 Determinación de la porosidad del concreto

La medición del contenido de aire se realizó por el método de presión y se utilizó el recipiente tipo B (ASTM C-231, 2017). La porosidad del concreto (P) o total de huecos en el material compuesto, se ha modelado (1) como una función de: la relación agua/cemento, el grado de hidratación del cemento (h), el volumen de aire atrapado (A), las cantidades de agregados fino (arena, Af) y grueso (grava, Ag), y del cemento (c); y las gravedades específicas de los agregados ( $\rho_f$  y  $\rho_g$ ). En este estudio se aplicó el valor de 0.7 para hidratación del cemento (Solís-Carcaño y 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 resistencia a la compresión

Para la prueba a resistencia a compresión, se realizó de acuerdo a los parámetros de la norma (ASTM C-39, 2020). Se realizaron muestras cilíndricas con dimensiones estándar: 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Se efectuó el ensayo a compresión a los 7, 14 y 28 días de curado, para observar el incremento de resistencia al alcanzar el máximo de curado. El cabeceo del cilindro se realizó con placas de neopreno y se aplicó carga constante hasta el fallo de los especímenes.

## 2.3 Técnicas electroquímicas

### 2.3.1 Medición potencial de media celda

La norma (ASTM C-876-09, 2009), establecen intervalos en el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) que indican la probabilidad de corrosión de la superficie y posible riesgo de la barra de refuerzo. Con los valores obtenidos es factible elaborar un diagnóstico del grado de corrosión de la armadura de concreto. El análisis de medición del potencial de media celda, se realizó con base en el uso de un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado (Ag/AgCl). Se determinó la medición del potencial de cada barra de acero incrustada en el concreto, el valor registrado es el promedio de estas medidas. Las mediciones se realizaron durante 168 días de exposición salina. Se utilizó un

multímetro y un interruptor que conectó los dos electrodos, entre el cloruro de plata y la barra de acero.

En la Tabla 3 presenta la conversión de los potenciales de corrosión obtenidos con el electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado sumando +50 mV (Berkeley et. al., 1990; Chess et. al., 1998).

Tabla 3. Criterio para medir el riesgo de daño del acero de refuerzo del concreto, en la medición del potencial de media celda.

$E_{corr}$ vs Cu/CuSO <sub>4</sub> (mV)	$E_{corr}$ vs Ag/AgCl (mV)	Riesgo de daño (%)
> -200	>-150	10% probabilidad de corrosión
Entre -200 A -350	Entre -150 A -300	Zona de Incertidumbre
< -350	< -300	90% probabilidad de corrosión

### 2.3.2 Técnica de ruido electroquímico

La corrosión es considerada como un proceso en equilibrio y de cinética constante, mientras que, en el caso del ruido electroquímico, se registran desequilibrios en las reacciones electroquímicas en intervalos de tiempo muy cortos (Goellner, 2004). Para las medidas de ruido electroquímico se utilizó un potenciostato de Gill AC-ACM Instruments, se tomaron 1024 puntos de lectura con una velocidad constante de 1 punto/segundo. La configuración para la medición fue de tres varillas de acero nominalmente idéntico, mientras que el tercer electrodo nominalmente idéntico a los dos electrodos de trabajo actúa como electrodo de referencia (Sánchez-Amaya et. al., 2009; Blanco et. al., 2019).

El ruido electroquímico puede ser caracterizado por parámetros estadísticos comunes como la media, la varianza y la desviación estándar; en particular el uso de la desviación estándar de potencial/corriente puede hacerse por separado, o bien por su cociente. Denominado resistencia de ruido ( $R_n$ ), en la expresión (2) se calcula como el cociente entre las desviaciones estándar del registro de potencial e intensidad de corriente (Sánchez et. al., 2005; Bertocci et. al., 1997).

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

Además de lo mencionado anteriormente, otro valor estadístico es utilizado para el análisis del ruido en corriente, según la ecuación (3) que es la razón de la desviación estándar con la raíz media cuadrática, llamado “índice de localización ó picado” (L.I ó I.P), (Sánchez et. al., 2005).

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

En la Tabla 4 se muestra el rango de valores del índice de localización que representa el tipo de corrosión en el acero de refuerzo.

Tabla 4. Valores de índice de localización.

Índice de localización	Tipo de corrosión
0.001 - 0.01	Generalizada
0.01 –0.1	Mixta
0.1 – 1	Localizada
> 1	Iniciado de picado

De acuerdo a los rangos de valores (Rincón y DURAR et. al., 1997), se puede determinar la vida útil de concreto reforzado a partir de la densidad corriente ( $i_{corr}$ ) con los datos establecidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Nivel de vida útil en el sistema acero/concreto.

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

### 2.3.3 Técnica de resistencia a la polarización lineal

Para la medición de la resistencia a la polarización lineal se utilizó el mismo Gill AC-ACM Instruments, se aplicó una pequeña señal de voltaje entre -50 mV y +50 mV sobre el potencial de corrosión (ASTM G-59-97, 2014). El método de polarización lineal,  $R_p$  se puede obtener gráficamente mediante la expresión (4) como la tangente a la curva de polarización en  $E_{corr}$  (Román et. al., 2016).

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

A partir de la ecuación de Stern-Geary (5), se relacionó la densidad de corriente de corrosión  $i_{corr}$ , con la  $R_p$ , mediante una constante de proporcionalidad B (Román et. al., 2016). La constante B puede adquirir los valores de 0.026 V y 0.052 V, dependiendo del tipo de sistema analizado (Sagües, 1991).

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

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización difracción de rayos X

La Figura 2 detalla los difractogramas de GP obtenidos a partir de las técnicas DRX, se muestra un sólido policristalino de ajuste ordenado y con una intensidad de pico con valores de 2 $\theta$  aproximadamente 26° y 27°. Estos valores son similares a algunos reportados por autores que describen el pico característico del grafito (Yuan et. al., 2012). Se presentan 2 formas cristalinas diferentes del carbono: hexagonal (2H) y romboédrica (3R).

La estructura 2H, es la forma más común en las fases identificadas con valores 39.9% y el 3R con valores de 27.4%, con una adición total de 67.3% en contenido de carbono. La muestra contiene 32.6 % de componentes arcillosos como: cuarzo, filosilicatos esmectica, caolinita, mica.

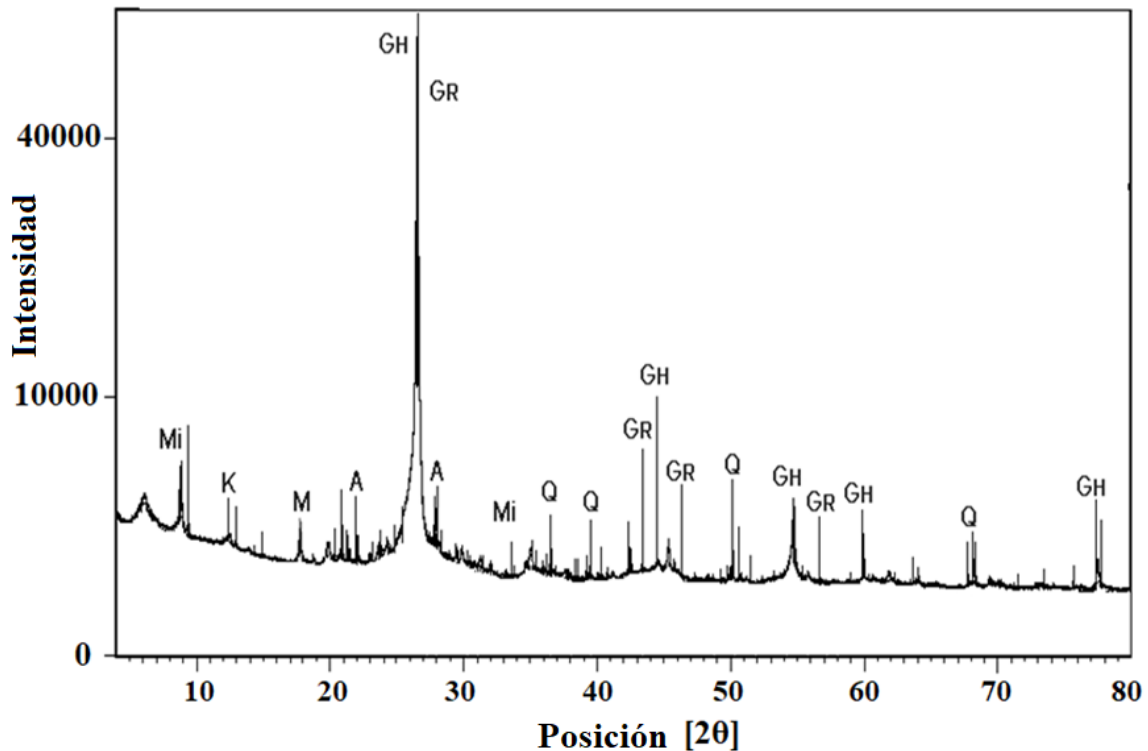


Figura 2. Difractogramas de rayos –X de GP. Mi: mica; K: caolinita; M: montmorillonita; G<sub>H</sub>: grafito(2H); G<sub>R</sub>: grafito (3R); A: anortita; Q: Cuarzo.

La Figura 3 corresponde a los difractogramas de la muestra control y con adición de GP, después de un periodo de curado de 28 días. El cemento hidratado de 28 días produce las siguientes fases: silicato de calcio hidratado (CSH) que es el responsable de la adherencia y resistencia con los aglutinantes, etringita (E) da mayor cohesión al cemento y la portlandita (CH) mantiene la alcalinidad, es decir, el pH de la pasta a valores altos entre 12-13 (Helena y Lucia, 2011; Giraldo y Tobón, 2006). La Figura 3a se muestran las fases cristalinas de hidratación del concreto, se observaron picos elevados de cuarzo (Q) y calcita (Ca); además de Dolomita (D) y plagioclasas o Andesina (A). Los principales elementos abundantes que aparecen en la muestra control son Q y Ca, debido a la principal presencia de calizas en el cemento.

La Figura 3b), c) y d) se observa las muestras con diferente porcentaje de grafito, como se puede observar un pico de intensidad que no aumenta con el incremento de GP, lo que muestra que existe una ausencia de participación directa en la hidratación de la pasta de concreto. Se observa que el análisis de DRX no mostró una intensidad fuerte en los picos de CH y CSH; varios autores indican que los picos con valores 2θ aproximadamente 29 ° pueden asignarse a la fase CSH, y los picos con valores 2θ aproximadamente 18 ° y 34 ° pueden asignarse a CH (Giraldo y Tobón, 2006; Becerra, 2014).

La ausencia de portlandita en el difractograma puede deberse a que la muestra proviene de la superficie del cilindro, donde los efectos de carbonatación pueden oscurecer la identificación (Vetter et. al., 2019).

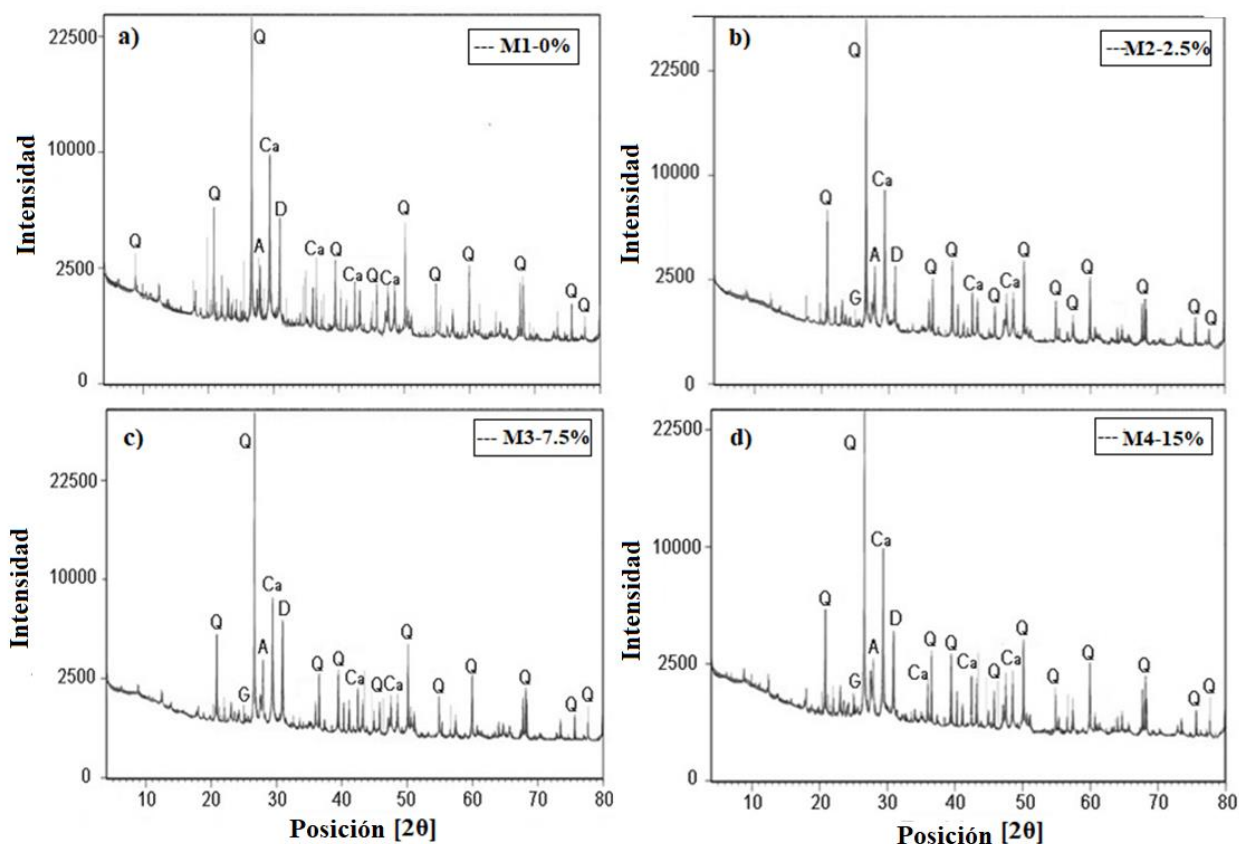


Figura 3. Difractogramas de rayos X de la pasta de concreto. a) M1-0%, b) M2-2.5% c) M3-7.5% y d) M4-15%. Q: cuarzo; Ca: calcita; D: dolomita; G: grafito; A: andesina, curado a 28 días.

### 3.2 Caracterización microscopio electrónico de barrido

Las micrografías MEB del concreto se presentan en la Figura 4, el análisis visual de la Figura 4a pertenece a la muestra control M1, se aprecian microfisuras (m) en la matriz de la pasta, como resultado de la técnica de resistencia a la compresión y a la extracción de la muestra. En conjunto se observaron silicatos de calcio hidratados (CSH), y mayor presencia de portlandita (CH) y etringita (E). Para el análisis visual los cristales de E, son de formas alargadas, generalmente en hábitats fibrosos o en forma de largos bastones. El CH se presenta normalmente en forma de plaquetas hexagonales delgadas, a menudo de décimas de micrómetros de ancho (Vetter et. al., 2019).

En la la Figura 4b corresponde la micrografía de la muestra M3 con 7.5% de GP, se visualiza una estructura compacta con mayor formación de CSH, llenando las áreas vacías de la matriz del cemento, reduciendo la porosidad del concreto y mejorando la adherencia sobre la partícula de carbono (GP).

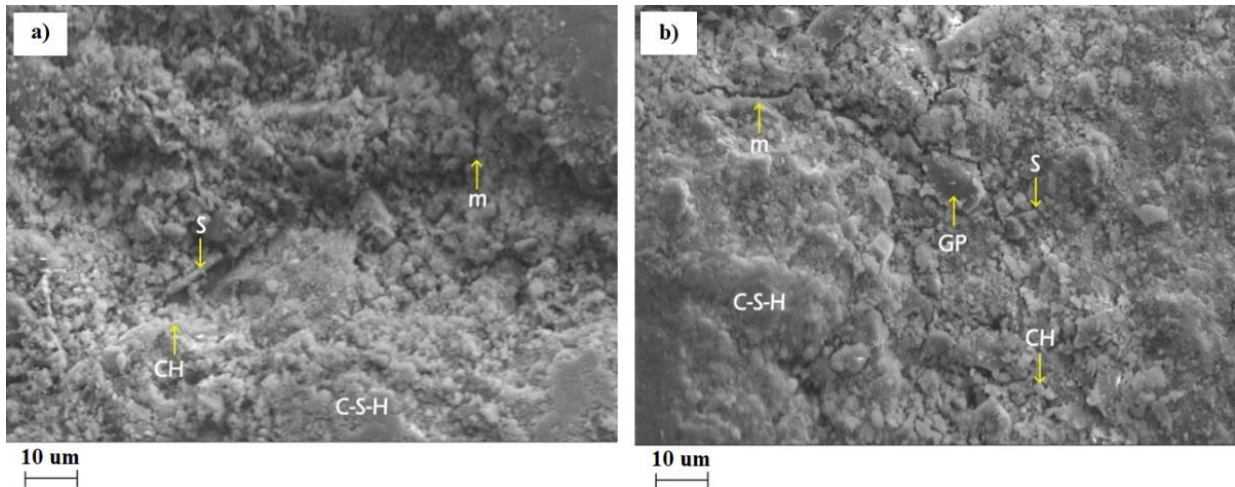


Figura 4. Micrografías MEB, a) M1-0% y b) M3-7.5% de GP, curado a 28 días.

### 3.3 Porosidad del concreto

La Tabla 6 se muestran los valores de porcentaje de porosidad del concreto, como se puede observar que al añadir contenido de grafito en 2.5% en peso de cemento, la mezcla adquiere mayor absorción de agua y afecta la relación agua/cemento en comparación con la muestra control. La muestra M1 registra un porcentaje de porosidad 22 % con una relación a/c de 0.59, los resultados muestran que en el diseño M2 con 2.5% de GP disminuye la porosidad del concreto respecto a la muestra M1; las muestra M3 y M4 registran un mayor incremento de a/c debido al aumento de la cantidad de agua con valores de 0.61 y 0.81.

En términos de durabilidad del concreto, un aumento en la porosidad de la pasta ocasiona que los agentes del medio ambiente requieren que el material sea permeable para poder penetrar a través de la masa del material; estos agentes también son auxiliados para su transporte interno por difusión (Solís- Carcaño y Moreno, 2006).

Tabla 6. Porosidad del concreto.

Muestras	a/c	Porosidad (%)
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 a la compresión

La Tabla 7 se presenta los valores promedio de la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) después de 7, 14 y 28 días de curado. La muestra control M1-0, se diseñó para una resistencia teórica de 250 kg/cm<sup>2</sup>, durante los 28 días de curado. Adquirió una resistencia experimental máxima promedio de 258 kg/cm<sup>2</sup> superando el valor de diseño teórico. La muestra M2 con 2.5% GP, se observa un aumento de la resistencia a la compresión a edades tempranas de 7 días con valor de 242 kg/cm<sup>2</sup>. Durante los 28 días de curado, la resistencia a la compresión aumentó un 4.6% en comparación con la resistencia de la muestra control. La muestra M3 con 7.5% de GP, durante los días de curado se observa un incremento constante de  $f'c$ , alcanzando una resistencia final a la compresión de 267 kg/cm<sup>2</sup>; la muestra M4 con 15% de GP presenta un  $f'c$  bajo con un valor de 244 kg/cm<sup>2</sup>, debido al aumento de la cantidad de agua añadida.



Tabla 7. Valores de resistencia a la compresión ( $F'c$ ).

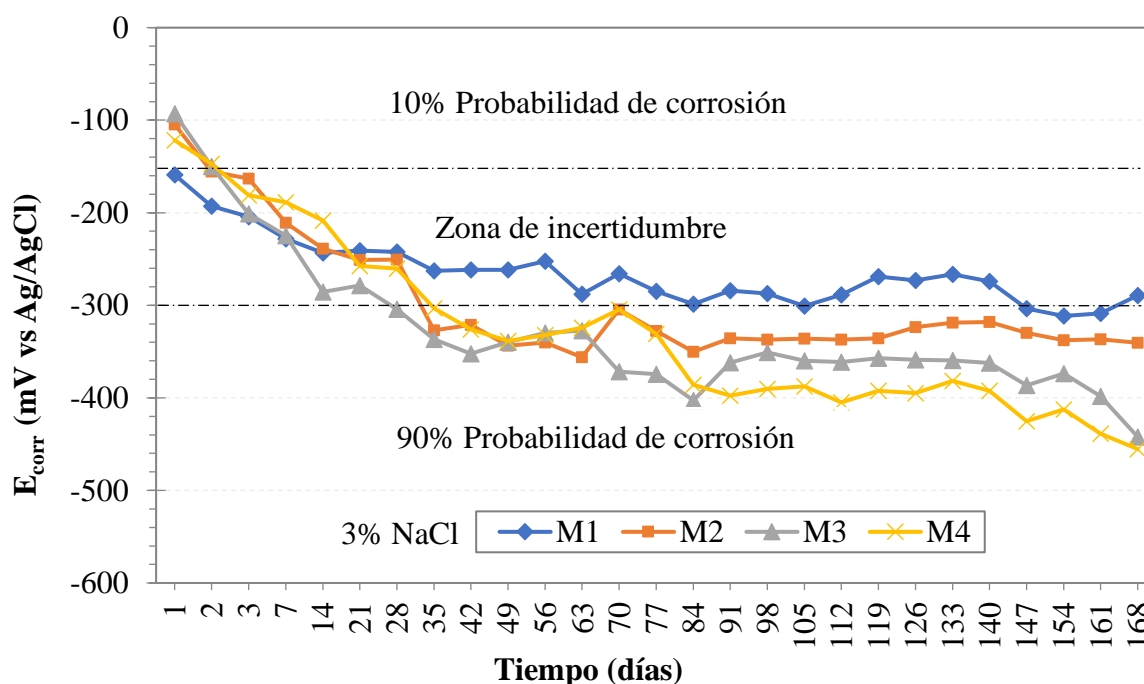
Muestras	Resistencia a la compresión ( $\text{Kg/cm}^2$ )		
	7 días	14 días	28 días
M1-0	181.5	235.9	257.7
M2-2.5	242.0	267.3	271.5
M3-7.5	199.9	241.8	266.8
M4-15	188.9	222.1	244.2

### 3.5 Potencial de media celda

Después de 168 días sumergidos en solución salina al 3% de cloruro de sodio (NaCl), los resultados del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) se detallan en la Figura 5. Se observó una disminución del potencial en los primeros días para todas las muestras, adquiriendo valores más negativos entre -100 mV y -250 mV, estimando un 10 por ciento de probabilidad a zona de incertidumbre. La resistividad del concreto y el oxígeno en los poros de la matriz del concreto son factores que influyen en los valores de potencial (Castellote et. al., 2002). El GP es un material conductor añadido al concreto; debería implicar la reducción de la resistividad eléctrica y el aumento del transporte de los iones cloruro, provocando la formación de óxido no protector en el metal. Como hay dos materiales conductores como son el acero de refuerzo y el GP, indicando que el material menos noble desarrollará mayor nivel de corrosión. Este hecho muestra porque los valores negativos del potencial de corrosión en las muestras de GP.

Con el tiempo, todas las muestras con adición de GP tuvieron un descenso más negativo en los valores de potencial, ingresando en una zona de 90% de probabilidad de corrosión. Entre los días 84 y 148, se pueden observar valores de potencial de corrosión constantes, entre -280 mV y -400 mV, indica la posible formación de densas capas de óxido no protector sobre el acero.

Todas las muestras al final del experimento en el día 168 de inmersión, están ubicadas en la zona de 90% probabilidad de corrosión, la muestra M4 con 15% de GP, es la que tiene el valor de potencial más negativo de -460 mV debido a los factores antes descritos y además a la cantidad de agua añadida.


 Figura 5. Valores de potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ).

### 3.6 Ruido electroquímico

El promedio de las fluctuaciones de resistencia de ruido electroquímico se presenta en la figura 6. Al inicio de la medición todas las muestras presentan valores bajos de  $R_n$  entre  $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; durante los días 28 y 70. La muestra M1 y M3 se observa fluctuaciones altos y bajos de  $R_n$ , posiblemente puede ser a la formación de películas de óxido no protector, manteniendo pasivo el metal. Al final del día 168 de exposición al medio salino, todas las muestras mantienen valores bajos de resistencia al ruido alrededor de  $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

La adicción de GP en la pasta de concreto en diferente porcentaje, afecta a las propiedades electroquímicas del metal adquiriendo valores muy bajos de  $R_n$ , este evento se puede explicar por el cambio de oxígeno en la interfaz acero/concreto, como consecuencia del cambio en el porcentaje de porosidad de la pasta. Además, el contenido de GP disminuye la resistividad del concreto; con valores de  $R_n$  más bajos indica un alto proceso de corrosión del metal en el transcurso del tiempo (Zhao et. al., 2007).

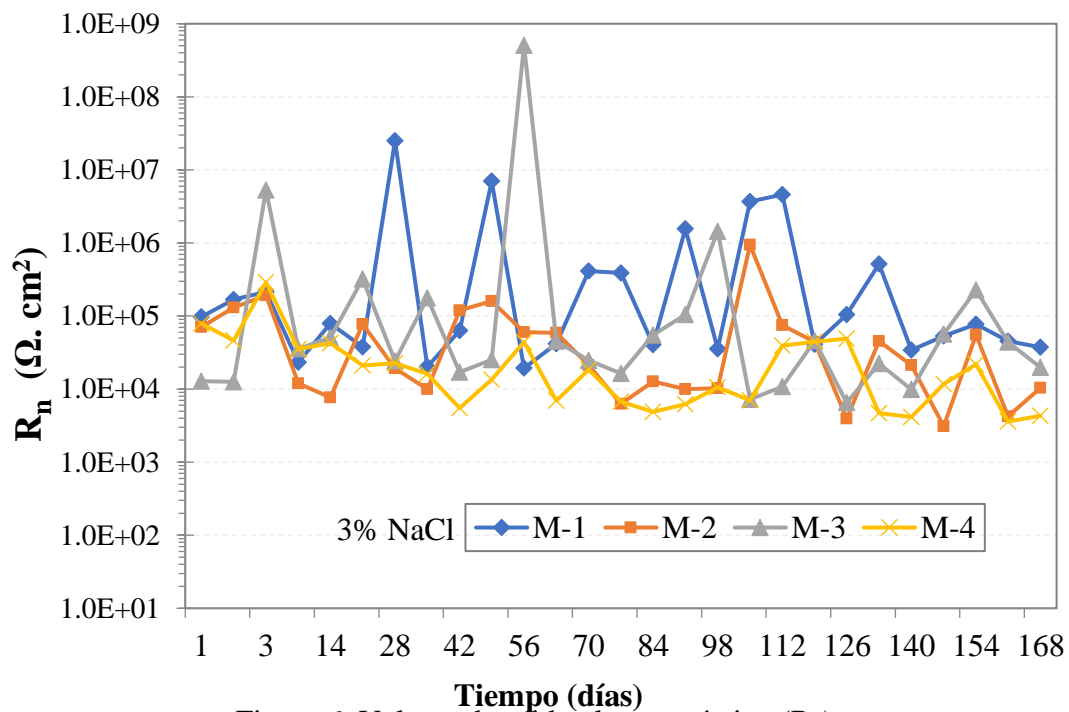


Figura 6. Valores de ruido electroquímico ( $R_n$ ).

Los valores del índice de localización se muestran en la Figura 7, al inicio de la prueba hasta el final de la exposición. Se pueden observar eventos o corrosión de tipo localizado, debido a que existe una elevada velocidad de disolución del metal en lugares discretos de su superficie (Sanz et. al., 1999). Esto representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad ya que se manifiesta en áreas específicas (Salazar-Jiménez, 2015). Si el tiempo de exposición se prolonga, el inicio de picaduras puede ocurrir en el metal.

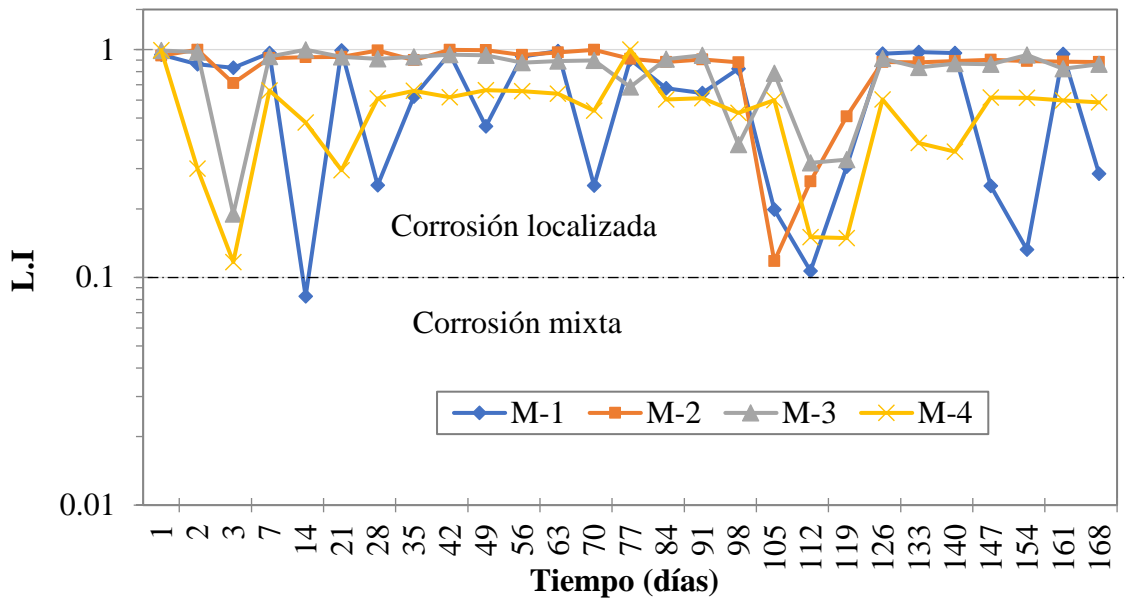


Figura 7. Valores de índice de localización del acero de refuerzo.

Los valores de vida útil de concreto reforzado se detallan en la Figura 8, donde se registraron todas las muestras al momento de estar inmerso en ambiente salino luego de 24 horas. Se pueden observar valores de  $i_{corr}$  muy altos entre 0.1 y 0.5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , presentando un rango de corrosión entre moderado y muy elevado. Este comportamiento coincide con los valores negativos del ensayo de potencial de corrosión. Las muestras con nivel de reemplazo de GP, respectivamente presentan valores de  $i_{corr}$  muy altos, como se pueden apreciar y aumenta con el tiempo, demostrando una corrosión muy alta en las armaduras y en la vida útil del concreto.

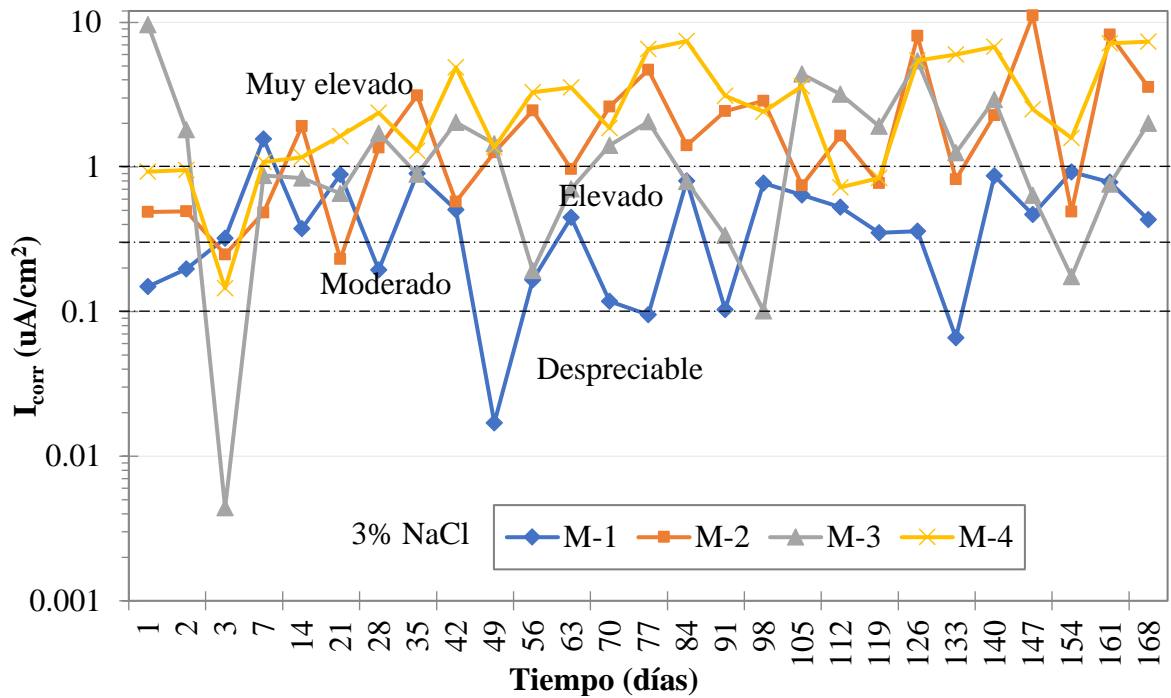


Figura 8. Nivel de vida útil del concreto reforzado.

### 3.7 Resistencia a la polarización lineal

La Figura 9 muestra los valores de resistencia a la polarización en el transcurso del tiempo, se puede observar valores de  $R_p$  muy bajos, en las 24 horas de inmersión y hasta el final de la medición en el experimento de RPL. Durante los días 42 y 70 se presenta un incremento en la  $R_p$  de las muestras M1 y M2, tal vez puede indicar una disminución en la velocidad de corrosión del metal, los valores de  $R_p$  tan elevados son un indicativo de que el acero esta pasivo (Blanco et. al., 2019). Las muestras con contenido de GP, adquirieron valores constantes de entre  $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; puede ocurrir una alta interacción con los iones cloruros en la interfaz del acero/concreto registrando valores muy bajos de  $R_p$ . Se muestra que los iones cloruros han despasivado el metal y el material tiene muy alta corrosión en ciertos momentos a medida que avanza el tiempo de inmersión.

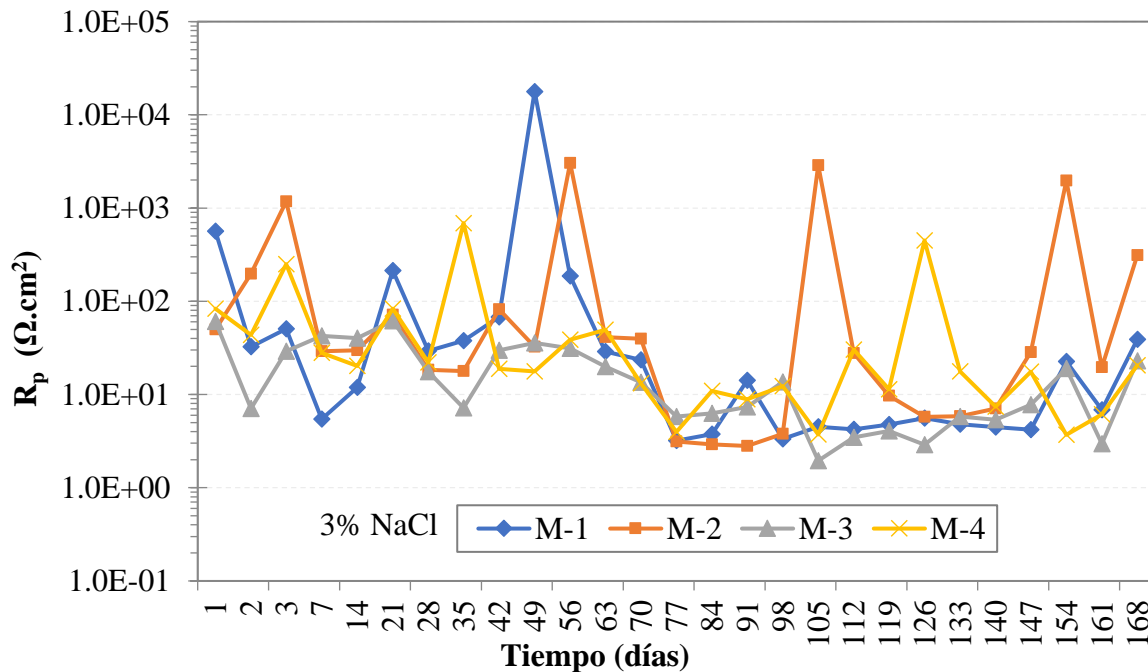


Figura 9. Valores de resistencia a la polarización ( $R_p$ ) en el transcurso del tiempo.

## 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo y dentro del alcance de esta investigación, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

En el ensayo de resistencia a la compresión la muestra M2 con contenido 2.5% de GP, presentó un valor alto en las propiedades mecánicas del concreto con respecto a la muestra control, pero el porcentaje de porosidad en la pasta de concreto disminuyó; este hecho puede deberse a la absorción de agua de las partículas de GP en la matriz del concreto.

Las muestras con adición de 7.5% y 15 % de GP, se requirió mayor contenido de agua aumentando la relación a/c.

En las técnicas de DRX, el GP agregado al concreto no tuvo interacción en el proceso de las fases cristalinas de hidratación del concreto.

Todas las muestras sumergidas en medio salino presentaron potencial de corrosión negativos con valores entre -290 mV y -450 mV, ingresando en una zona de 90% probabilidad de corrosión.

En las mediciones electroquímicas de las muestras, presentaron valores bajos de  $R_n$  y  $R_p$ , de entre  $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; indicando un alto proceso de corrosión sobre el acero de refuerzo.

El nivel de vida útil del concreto reforzado con adición de GP, presentó un nivel de corrosión entre

elevado y muy elevado con valores de densidad de corriente ( $I_{\text{corr}}$ ) superiores a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

El tipo de corrosión para las barras de acero de refuerzo estuvo en el rango de corrosión localizada, desde los primeros días de inmersión y de manera constante con el avance del tiempo de exposición al medio salino, con valores de índice de localización de entre 0.1 y 1.

## 5. AGRADECIMIENTOS






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

## 6. REFERENCIAS

- 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](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](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](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](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 cristalquímicas 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>

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

I R. S. Kmick<sup>1</sup>, M. G. Gazolla<sup>1</sup>, R. M. da Silva Junior<sup>1</sup>,  
A. P. B. Capraro<sup>\*2</sup>, K. A. W. Moreira<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [anapcapraro@gmail.com](mailto:anapcapraro@gmail.com)

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

Recepción: 11/09/2020 | Aceptación: 30/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Kmick, R. S., Gazolla, M. G., da Silva Junior, R. M., Capraro, A. P. B., Moreira, K. A. W. (2021), "Análisis comparativo de la efectividad y eficiencia de tres sistemas de impermeabilización", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. x-x, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.509>

<sup>1</sup> Engenharia Civil, Centro Universitário Araucária, Araucária, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, los autores Renata dos Santos Kmick, Micheli Gazolla y Renato Moura da Silva Junior contribuyeron a la discusión de la idea original y al desarrollo de ensayos y recolección de datos. La autora Ana Paula Brandão Capraro contribuyó a la discusión de la idea original, redacción del trabajo y discusión de resultados. El autor Kirke Moreira contribuyó a la recopilación de datos y redacción del trabajo.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

## Análise comparativa da eficácia e eficiência de três sistemas impermeabilizantes

### 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.

**Palabras clave:** sistemas de impermeabilização; eficácia; eficiência; envelhecimento acelerado; redução de desempenho.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de impermeabilización son esenciales para asegurar la durabilidad de cualquier construcción y su negligencia puede traer como resultado la infiltración, la cual propicia mecanismos patológicos como la lixiviación, degradación del concreto, corrosión de armaduras y burbujas en los revestimientos (Aldea e Shah, 1999).

Un material considerado impermeable es aquel que impide el paso de agua de un plano para otro. O incluso, un sustrato que no absorba más que 2,5% de humedad cuando es comparado a una muestra de referencia (Basheer *et al.*, 2001).

La falta de información al respecto de las técnicas y el uso de materiales inadecuados, entre otros factores, por mucho tiempo fueron los responsables por los fracasos en la impermeabilización (PICCHI, 1986). El costo de una impermeabilización bien concebida y ejecutada puede representar 1% a 3% del valor de una obra. Pérdidas que surgen de los costos de mantenimiento de un inmueble pueden llegar de 5% a 10% del valor del desarrollo (Bauer *et al.*, 2010).

Nuevas normas, como es el caso de la NBR 15575 (ABNT, 2013), y actualizaciones de normas existentes vienen direccionando las recomendaciones a la atención de las necesidades y desempeños de las edificaciones, exigiendo que todos los sistemas habitacionales atiendan a un nivel mínimo de desempeño a lo largo de la vida útil determinada en proyecto (VUP).

El sistema de impermeabilización actualmente más usado es el que hace uso de manto asfáltico (Menezes, 2018), por lo tanto, los fabricantes han invertido bastante en investigaciones de desarrollo de nuevos productos, ampliando el mercado y trayendo el beneficio de la durabilidad en las obras, con reducción de costos.

De acuerdo con Andrello y Takagi (2017), aplicando un producto con mayor desempeño, se economiza en la aplicación y mantenimiento de la edificación. Además, según el mismo autor, los fabricantes tienen productos con la misma finalidad, sin embargo, las características cambian de producto a producto. Si el consumidor o el aplicador no dan atención para eso, podrá aplicar un producto de forma igual para todos los casos, no logrando de esa forma, el desempeño esperado.

Tomando en consideración lo expuesto, el presente estudio tuvo por objetivo el análisis comparativo de la eficacia y eficiencia de tres sistemas impermeabilizantes, disponibles en el mercado, y recomendados, por sus fabricantes, para ser utilizados en la losa de techo no transitable. Para el análisis de la eficacia de los sistemas impermeabilizantes, es decir el éxito del sistema como capa impermeable del concreto, fueron realizados los ensayos de estanqueidad (NBR 15575-3, 2013), absorción por inmersión (NBR 9778, 2005) y absorción por capilaridad (NBR 9779, 2012) con edad inicial, posteriormente al curado de los sistemas aplicados. Para el análisis de la eficiencia del sistema, es decir el desempeño a lo largo del tiempo, fueron realizados los mismos ensayos de absorción por inmersión (NBR 9778, 2005) y absorción por capilaridad (NBR 9779, 2012), sin embargo, luego de la exposición de las muestras en ciclos de mojado y secado, visando representar un ciclo de envejecimiento acelerado de los sistemas.

## 2. METODOLOGÍA

Este estudio contó con la realización de un programa experimental, con la confección de muestras de concreto y protección de estas como los materiales impermeabilizantes a ser evaluados.

### 2.1 Materiales impermeabilizantes

Para la elección de los tres productos impermeabilizantes usados en la presente investigación fueron tomados en consideración: (i) el local de aplicación, siendo este recomendado para el mismo fin entre los tres productos, recomendación hecha por los fabricantes; (ii) los productos ser normalizados; (iii) y la clasificación, en cuanto la vida útil, por el IBI (Instituto Brasileiro de

Impermeabilización), siendo seleccionadas tres topes distintos de vida útil esperada. Fueron seleccionadas tres membranas, las cuales atienden a los criterios de fabricación y aplicación de las normas NBR 9685 (ABNT, 2005), NBR 13321 (ABNT, 2008), NBR 15885 (ABNT, 2010) y a los criterios de vida útil del IBI, citados por Morgado *et al.* (2018). Los productos, y sus respectivas normas y vida útiles están presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Productos impermeabilizantes usados en la investigación.

<b>Grupo de los Productos</b>	<b>Membranas</b>		
Norma (ABNT, NBR)	9685:2005	13321:2008	15885:2010
Productos	Emulsión Asfáltica	Membrana Acrílica	Resina Polimérica
Vida útil (IBI)	8	16	26

La membrana de emulsión asfáltica tiene como base asfalto modificado con polímeros y es emulsionado en agua, pronta para su uso y no agresiva al medio ambiente. Según el fabricante, mantenido en secreto por aspectos éticos, sus características son: buena performance de elasticidad y flexibilidad, la adherencia, la fácil manipulación y la aplicación. El producto puede ser aplicado en ambientes cerrados, formando una membrana continua y sin empalmes, con resistencia y durabilidad. Su uso puede ser en terrazas, jardineras, muros de contención, saunas, cámaras frigoríficas, canales, losas de pequeñas dimensiones, paredes y pisos fríos.

La membrana de resina acrílica es un material mono componente, aplicable en frío y listo para su uso. Debido a sus características, citadas por el fabricante, también mantenido en secreto, es considerado un excelente impermeabilizante y de buena durabilidad, fácil aplicación, buena elasticidad, resistente a los rayos U.V, con buena adherencia en sustratos cementíceos y fibrocemento y refleja rayos solares, reduciendo parte del calor absorbido por la estructura. Su aplicación puede ser en techos abovedados e inclinados, losas de concreto, canales de concreto, balcones y terrazas, techos de tanques y tejas de fibrocemento.

La resina termoplástica es un impermeabilizante flexible, bi componente, a base de polímeros acrílicos con cemento y reforzado con fibras, especialmente indicado para estructuras sujetas a movimiento. Es recomendado el uso en estructuras hidráulicas y que tenga contacto con agua potable, áreas húmedas como baños, balcones y fachadas, losas de techo con tráfico eventual y con sus debidas juntas de dilatación, piscinas y tanques, jardineras, entre otros. Presenta alta flexibilidad y estiramiento, pudiendo quedar expuesto al tiempo (resistente a los U.V) y resistente a altas presiones hidrostáticas positivas. Además, según el fabricante, posee fácil y rápida aplicación pudiendo ser aplicado manual o proyectada, no necesitando de curado.

La descripción de los productos impermeabilizantes que fueron utilizados en la investigación está dispuesta en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los productos impermeabilizantes usados en la investigación.

<b>Producto</b>	<b>Componentes</b>	<b>Características</b>
Emulsión Asfáltica	Asfalto (40-70% de concentración)	Densidad: 0,95 a 1,05 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad: 9.000 a 12.000 Cps Color: negro
Membrana Acrílica	Agua, cargas minerales, emulsión acrílica, pigmento, estabilizantes, antiespumante, biácida.	Densidad: 1,2 g/cm <sup>3</sup> Viscosidad: 1000 a 2500 Cps Color: Blanco
Resina Termoplástica	Polímeros Acrílicos (Resina Termoplástica), Cemento Portland (25 - 50% de concentración)	Densidad: 1,60g/cm <sup>3</sup> Color: Gris

## 2.2 Moldeado de las muestras

Las muestras usadas en el estudio fueron confeccionadas con concreto de cemento Portland CPV-ARI, resistencia de 35 MPa, dosis base 1:1:6 con relación agua/cemento de 0,495. El cemento usado posee peso específico de 3,13 g/cm<sup>3</sup>, el agregado fino posee la dimensión máxima 2,4mm y peso específico de 2,62 g/cm<sup>3</sup> y el agregado grueso usado fue una piedra 1, de peso específico igual a 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

Para el análisis de desempeño de los productos fueron moldeados 32 probetas cilíndricas 0,10x0,20m y 4 losas, con dimensiones de 0,6x0,6x0,07m. Posterior al curado de 28 días del concreto de las muestras, fue realizada la aplicación de los productos, según las orientaciones de las fichas técnicas (Tabla 3).

Tabla 3. Aplicación de los productos impermeabilizantes usados en la investigación.

Producto	Especificaciones	Intervalos	Tiempo de Secado
Emulsión Asfáltica	2 a 3 manos	12 horas	5 días
Membrana Acrílica	3 a 4 manos	6 horas	1 días
Resina Termoplástica	Espesor entre 2 a 4mm	6 horas	7 días

## 2.3 Análisis experimental

Las muestras de concreto moldeadas fueron sometidas a ensayos experimentales, los cuales tuvieron por objetivo evaluar la eficacia y la eficiencia del producto usado como impermeabilizante.

Para el análisis de la eficacia de los sistemas, es decir, desempeño inicial de los productos cuando son comparados con la serie referencia, está sin ninguna protección, fueron realizados los ensayos de test de estanqueidad, absorción por inmersión y absorción por capilaridad.

Los resultados de los ensayos de absorción por inmersión y absorción por capilaridad, que son cualitativos por presentar diferencias porcentuales de absorción, fueron analizados estadísticamente, por medio del ensayo de Tukey, con 95% de confianza. El ensayo tiene por objetivo destacar la menor diferencia significativa, estadísticamente, entre los datos analizados. Así siendo, con intervalo de 95% de confianza, las series (referencia de las tres impermeabilizadas) fueron comparadas, a fin de ser evaluada la diferencia estadística entre ellas en los ensayos cuantitativos realizados.

Para el ensayo de estanqueidad fueron utilizadas las cuatro losas, siendo tres de ellas con los productos seleccionados para la investigación y una para la comparación del comportamiento sin protección, siendo la muestra referencia. Las losas fueron sometidas al ensayo de estanqueidad, siendo expuestas a una lámina de agua de 0,03m por 72 horas, a través de un recipiente transparente y sellado, según recomendación del Anexo C NBR 15575-3 (ABNT, 2013), Figura 1.



Figura 1. Ensayo de estanqueidad realizado en laboratorio.

En paralelo fueron utilizados 12 probetas 10x20cm para la realización del ensayo de absorción por inmersión, de acuerdo con la NBR 9778 (ABNT, 2005), siendo 3 con aplicación de los productos y 3 para la serie referencia, sin aplicación. Posterior a dicha aplicación y secado de los productos, las probetas fueron llevadas a la estufa por 72 horas, a 40°C. La temperatura de secado fue así adoptada para evitar una sollicitación que los materiales no resistan. Luego del secado, fueron registradas los pesos de las muestras secas y posteriormente a los períodos de inmersión (24, 48 y 72 horas), fueron también registrados los pesos muestras inmersas.

Además, fue realizado el ensayo de absorción de agua por capilaridad, según NBR 9779 (ABNT, 2012). Fueron utilizadas 20 probetas, de las cuales 5 fueron impermeabilizados por la mitad, con cada impermeabilizante y 5 como referencia, sin aplicación de producto. Fue realizada la impermeabilización solamente de la parte inferior por ser la parte de la muestra en contacto con el agua durante el ensayo. Pasado el tiempo de secado de los productos, las probetas fueron llevadas a estufa bajo temperatura de 40°C por 72 horas y enfriadas a temperatura ambiente por 24 horas. Después de determinar el peso seco, las probetas fueron llevadas a un soporte y expuestas a una lámina de agua constante de 10mm. Durante el ensayo, fue determinado el peso saturado de las probetas en intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h y 72h. Luego de la determinación del peso, las probetas fueron ensayadas por compresión diametral, para permitir medición de la distribución del agua en su interior con el uso de termografía infrarroja.

Para la evaluación de la eficiencia de los productos, es decir su desempeño a lo largo del tiempo, fue adoptada una condición de envejecimiento acelerado, la cual consistió en un ciclo semanal de probetas cilíndricas usadas en el ensayo de absorción por inmersión. El ciclo alternó las muestras entre una condición de mojado (inmersión) y secado (exposición al sol e intemperie). El patrón de envejecimiento fue adoptado por ya haber sido utilizado en otros trabajos que buscaron acelerar el envejecimiento (Gao *et al.*, 2013; Gong *et al.*, 2016; Jiang y Niu, 2016).

Las muestras usadas en el análisis del envejecimiento acelerado fueron sujetas a tres conjuntos de ciclos, siendo cada uno compuesto por 8 ciclos (8 semanas), siendo las edades de análisis 84, 140 y 196 días. En las edades mencionadas, las probetas fueron sujetas a los procedimientos mencionados en el ensayo de absorción por inmersión.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Estanqueidad

Luego de realizar en las losas el ensayo de estanqueidad, éstas fueron observadas por 72 horas. Todavía, en el período evaluado, el cual es recomendado por la NBR 15575 (ABNT, 2013), no fue constatada la aparición de burbujas, infiltración en la parte inferior de las losas ni disminución del nivel de agua en la referencia de 0,03m. La Figura 2 presenta parte de las cuatro losas estudiadas, indicando la estanqueidad de todos los sistemas.

Cabe destacar que como todas las losas fueron consideradas estancas, no fue evaluada la diferencia de comportamiento, responsable de ser identificada por este ensayo, entre la muestra referencia (sin protección) y las muestras impermeabilizadas.

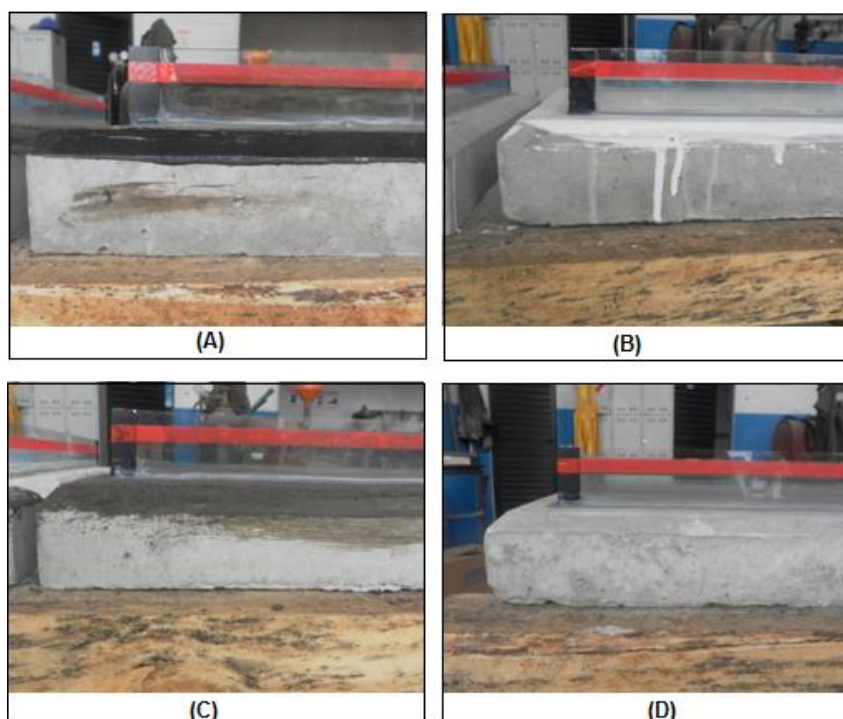


Figura 2. Resultado del ensayo de estanqueidad luego de 72 horas. A – Losa con emulsión asfáltica; B – Losa con membrana acrílica; C – Losa con resina termoplástica; D – Losa referencia.

#### 3.2 Absorción por inmersión

La Figura 3 presenta los resultados colectados para el valor de absorción por inmersión. El valor promedio inicial, en 24 horas, de las probetas impermeabilizadas fue de 0,3%, contra 5,17% de las probetas de referencia. Luego del período de 72 horas se observó un pequeño aumento de los valores, siendo el promedio de absorción de las probetas impermeabilizadas de 0,4%, y de 5,23% para la serie de referencia. Considerando la absorción referencia de 2,5% citada por Basheer *et al.* (2001), se nota que solamente las muestras impermeabilizadas pueden ser consideradas como sustratos estancos.

Analizando comparativamente los resultados obtenidos para las series impermeabilizadas se notó un comportamiento semejante entre ellas, y satisfactorio comparado con la serie referencia. Por la desviación estándar obtenida, las series emulsión asfáltica y resina termoplástica pudieron ser consideradas estadísticamente equivalentes, por el ensayo de Tukey, en todas las lecturas realizadas. A la edad final evaluada, 72 horas de ensayo, la membrana acrílica fue la que presentó

el menor valor, validado estadísticamente, entre todas las series evaluadas, indicando su mejor desempeño durante este ensayo.

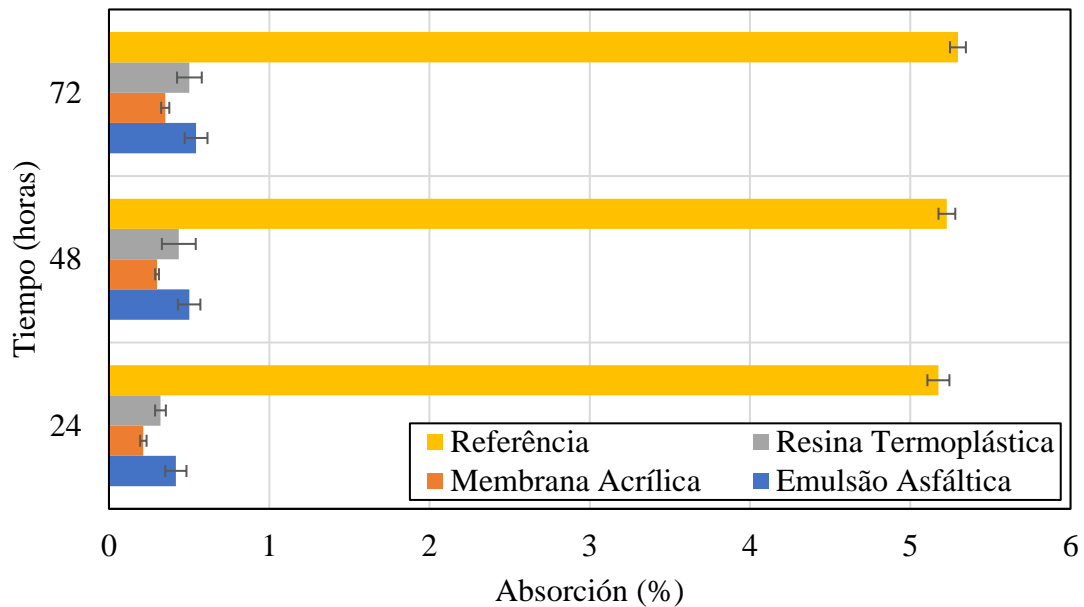


Figura 3. Resultado del ensayo de absorción por inmersión.

### 3.3 Absorción por capilaridad

En el período inicial del ensayo, 3 y 6 horas, el comportamiento de las probetas con los productos impermeabilizantes se puede considerar similar, ya que el promedio de la absorción en esos períodos fue entre 0,659%, siendo todos considerados estadísticamente equivalentes por el ensayo estadístico aplicado. Por tanto, en el último intervalo de lectura del ensayo, 72 horas, las probetas de la serie resina termoplástica presentaron menor valor de absorción de 1,05%, contra un promedio de 2,34% de los demás productos. Al final del ensayo la serie referencia tuvo una absorción 7,9 veces mayor que la serie de resina termoplástica, que tuvo el mejor comportamiento. La emulsión asfáltica y membrana acrílica se mantuvieron con equivalente estadísticamente, considerando la mayor variabilidad de desviación estándar entre ellos, según Figura 4.

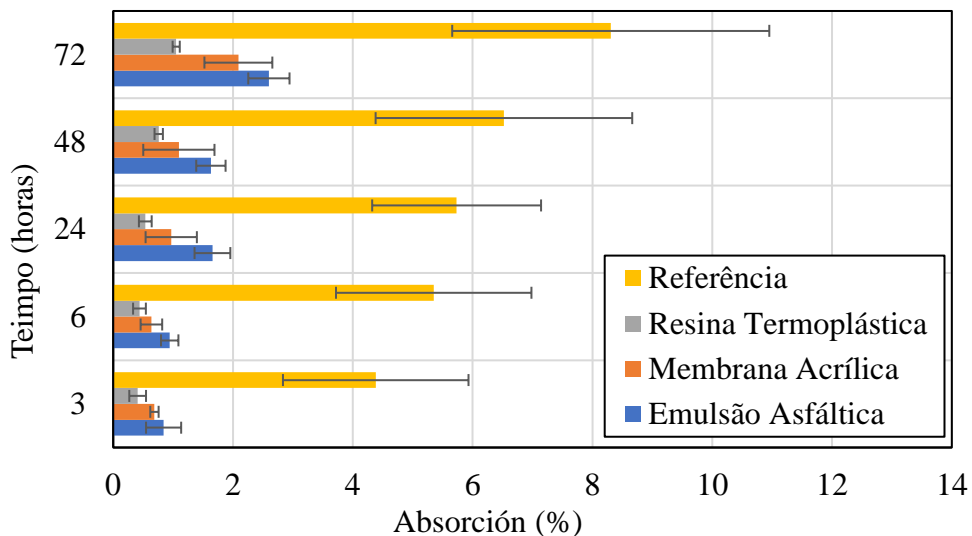


Figura 4. Resultado del ensayo de absorción por capilaridad.

El mejor desempeño de la resina termoplástica en el ensayo de absorción capilar confirma la indicación de Pezzolo (2013), que propone el uso del material para impermeabilización en rodapiés de paredes de drywall.

El análisis visual de las probetas sometidas al ensayo de compresión diametral y posteriormente, al análisis por termografía infrarroja, permitió la confirmación del desempeño inferior de la serie referencia y del desempeño semejante entre las series impermeabilizadas.

La Figura 5 presenta las probetas de la serie referencia que fueron sometidas al ensayo de compresión diametral. Para el caso de esa serie se notó una altura promedio del ascenso capilar de 4,3cm.

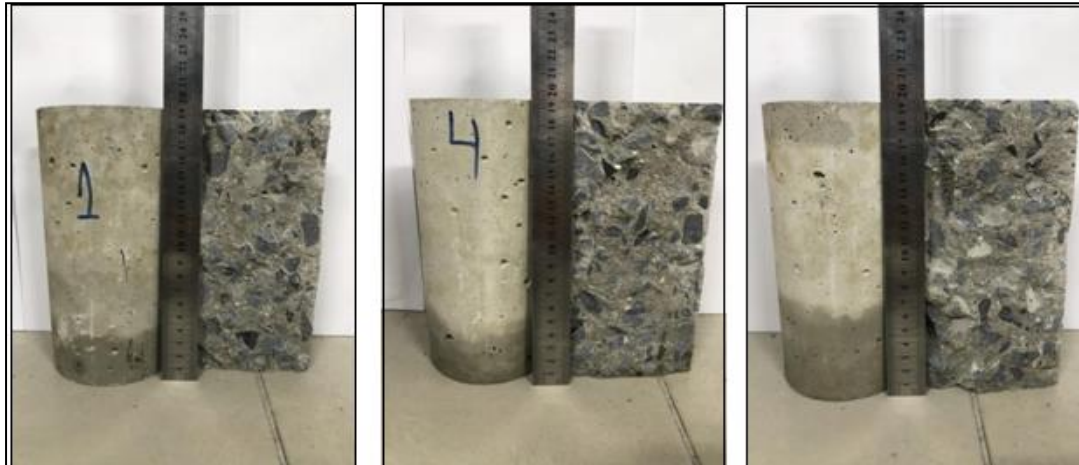


Figura 5. Probetas de la serie referencia posterior al ensayo de compresión diametral.

Las imágenes termográficas para la serie referencia, Figura 6, confirman la percolación del agua para el interior de la probeta, visto que la temperatura obtenida en el ensayo fue la menor entre las series estudiadas (23,1 °C).

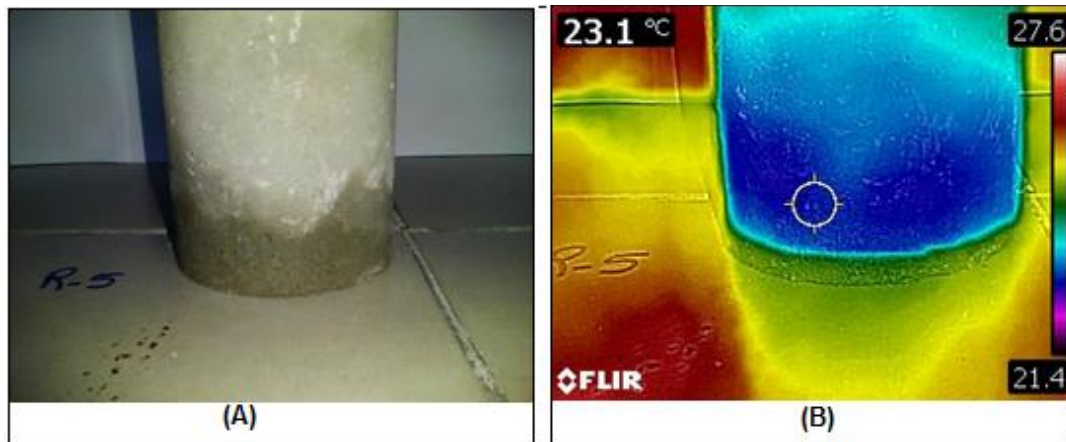


Figura 6. Imagen termográfica infrarroja para la serie referencia. A - Probeta posterior al ensayo de compresión diametral; B - Probeta durante el ensayo de termografía .

La Figura 7 presenta las probetas de las series impermeabilizadas luego del ensayo de compresión diametral. Para esas series la dificultad de obtención de las lecturas de ascenso capilar fue mayor, siendo el análisis realizado por medio de las imágenes termográficas, presentadas en las Figuras 8, 9 y 10. Se percibe que las temperaturas registradas en las imágenes termográficas son cercanas al mínimo indicado en la escala de referencia, al lado derecho de cada imagen, indicando la región de absorción de agua.

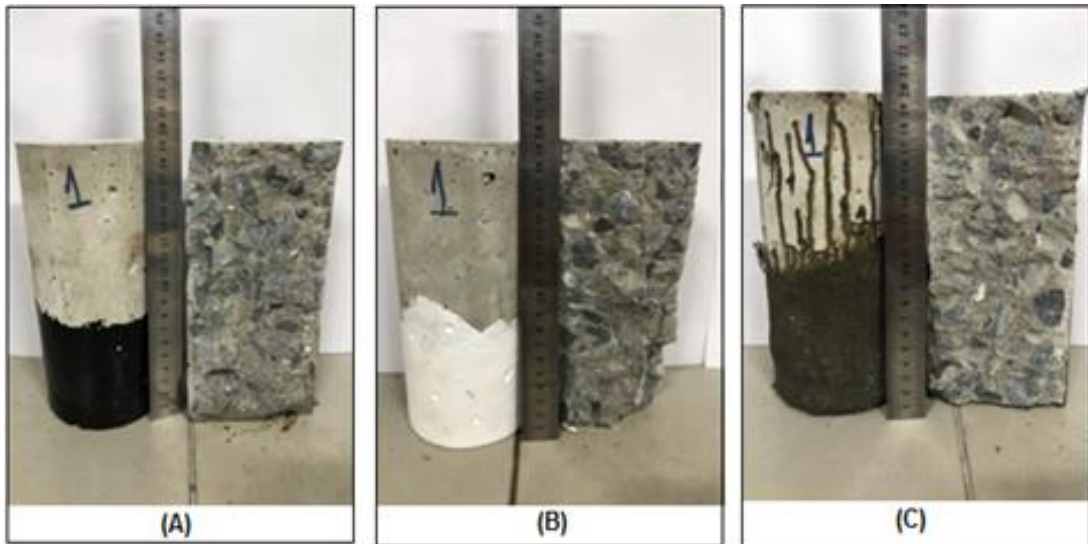


Figura 7. Probetas de las series impermeabilizadas luego del ensayo de compresión diametral. La – Muestra con emulsión asfáltica; B – Muestra con membrana acrílica; C – Muestra con resina termoplástica.

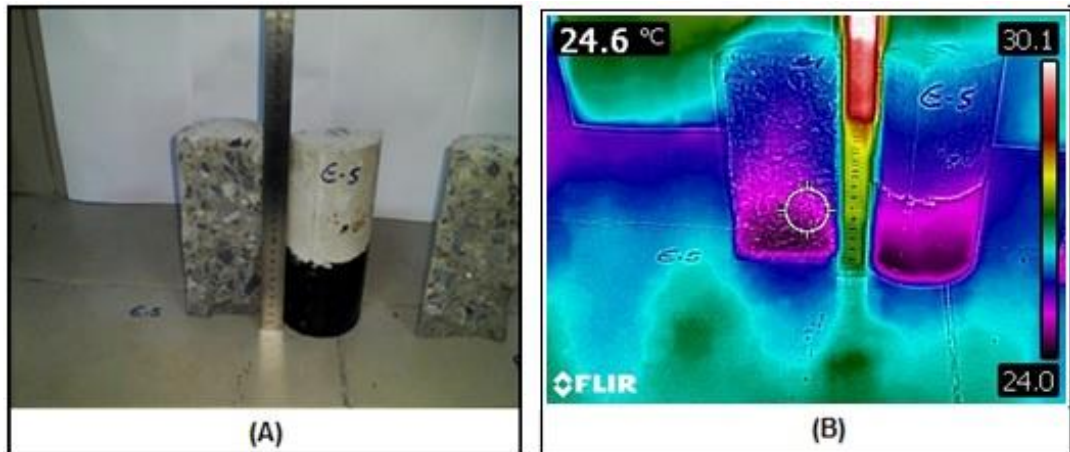


Figura 8. Imagen termográfica infrarroja para la serie con emulsión asfáltica. A - Probeta luego del ensayo de compresión diametral; B - Probeta durante el ensayo de termografía .

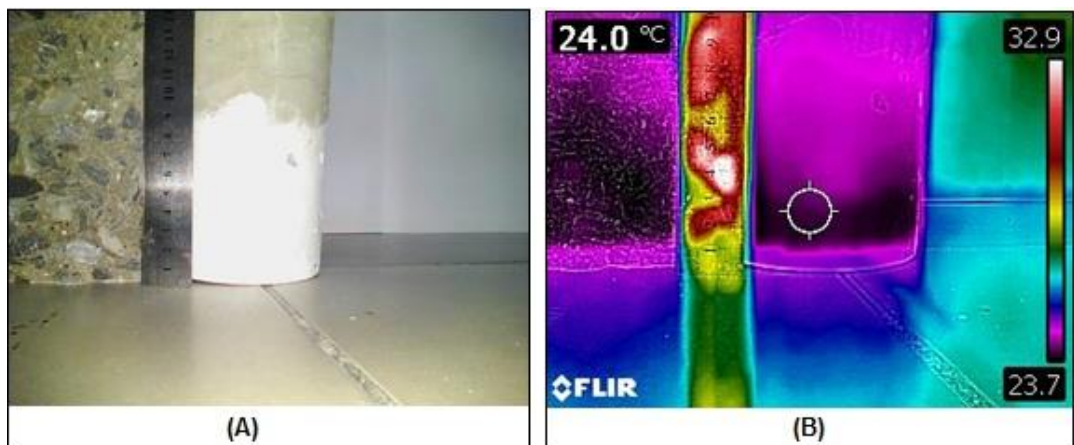


Figura 9. Imagen termográfica infrarroja para la serie con membrana acrílica. A - Probeta luego del ensayo de compresión diametral; B - Probeta durante el ensayo de termografía .



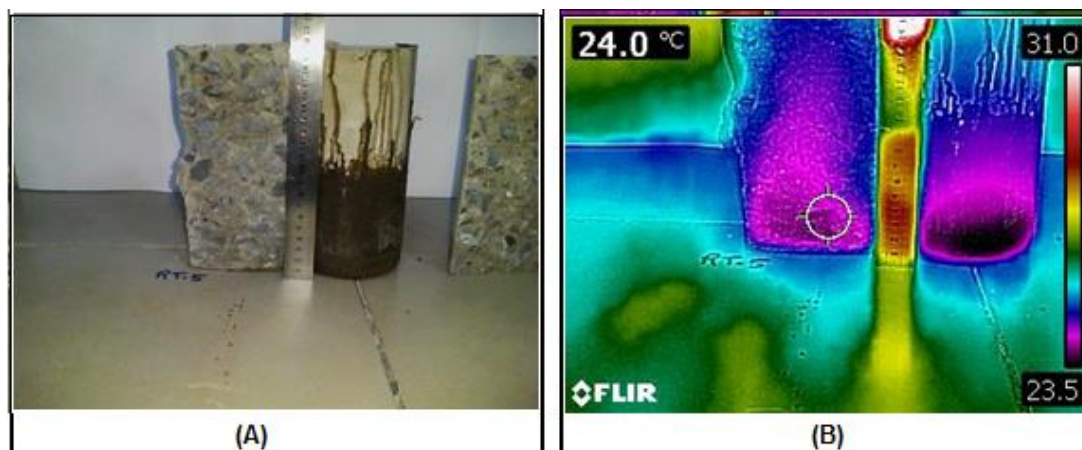


Figura 10. Imagen termográfica infrarroja para la serie con resina termoplástica. A - Probeta luego del ensayo de compresión diametral; B - Probeta durante el ensayo de termografía .

El ensayo de termografía indicó, entre las series impermeabilizadas, el mejor desempeño para la serie de emulsión asfáltica, que presentó la mayor temperatura, 24,6 °C. Las series de membrana acrílica y resina termoplástica presentaron la misma temperatura, indicando un comportamiento semejante, de 24 °C.

Además, según lo expuesto en la literatura, la variación de 1 °C a 2 °C, es considerada indicio de problemas (Cortizo, 2007; Freitas *et al.*, 2014). Siendo así, la diferencia de temperatura observada entre la serie referencia y las series impermeabilizadas ya es suficiente para indicar mejor desempeño de esta última.

Aun cuando sea pequeña la diferencia observada en la variación de la absorción, una vez que el análisis visual, en probetas ensayadas, confirmó el ascenso capilar. Con respecto a la pequeña variación, la literatura reporta que variaciones en el orden de 1°C ya son responsables de la identificación de infiltración en elementos de concreto (Maldague, 2001; Merlirinho, Matias y Farias, 2015; Lourenço, Matias y Faria, 2017; Rocha, Santos, Oliveira, Albuquerque y Póvoas, 2018).

### 3.4 Absorción por inmersión luego del envejecimiento acelerado

El ensayo de absorción luego del envejecimiento acelerado, presentado en la Figura 11, presentó reducción de absorción para la serie referencia a lo largo del tiempo. El resultado era esperado, una vez que la continua hidratación del cemento Portland ocasiona el taponado de los poros, disminuyendo así la permeabilidad del material (Rossignolo, 2005). Una vez que las probetas fueron sujetas al tiempo, cabe destacar la posible influencia del fenómeno de carbonatación, que puede colaborar en el relleno de los poros, por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), y reducción de la capacidad absorbente del material, como lo reportado por Ngala y Page (1997). Los resultados de absorción de la serie referencia fueron en el orden de 5% en la edad inicial para 3% en la edad final estudiada, confirmando el relleno de los poros.

Todas las series impermeabilizadas presentan a los 84 días absorción inferior a la presentada a los 28 días, también explicado por el secado y fijación de los productos en el período. Todavía, a partir de los 140 días fue posible notar una inversión del comportamiento, es decir, las series pasaron a presentar absorciones mayores si se compara a la edad de 28 días.

Cabe destacar que los tres impermeabilizantes aplicados, podían, según sus fabricantes, ser aplicados en locales abiertos, como losas de techo. Siendo así, por más que fuesen sometidos a ciclos de mojado y secado el desempeño no debería haber sido impactado. Según Silveira y Granato (2013), el sistema impermeabilizante debe ser capaz de soportar todos los tipos de solicitaciones durante la vida útil, sean de naturaleza mecánica ó química. Siendo así, la elección del sistema debe siempre tomado en consideración, las solicitaciones actuantes, de modo que el material aplicado

atienda la demanda propuesta.

Los valores obtenidos en ese ensayo además confirman el mejor desempeño de las series impermeabilizadas, siendo el promedio de absorción entre ellas, a los 196 días de 0,52%, contra 3,0% de la serie referencia. Todavía, se destaca la necesidad de observación del desempeño de estos materiales a lo largo del tiempo, visto que la ineficiencia de los mismos llevaría a una pérdida directa en la vida útil de las estructuras de concreto. Siendo la propuesta del trabajo la evaluación de la aplicación de los sistemas en losas de techo, se espera que los sistemas resistan la acción de los rayos UV, bien como la sollicitación higroscópica de mojado y secado constante.

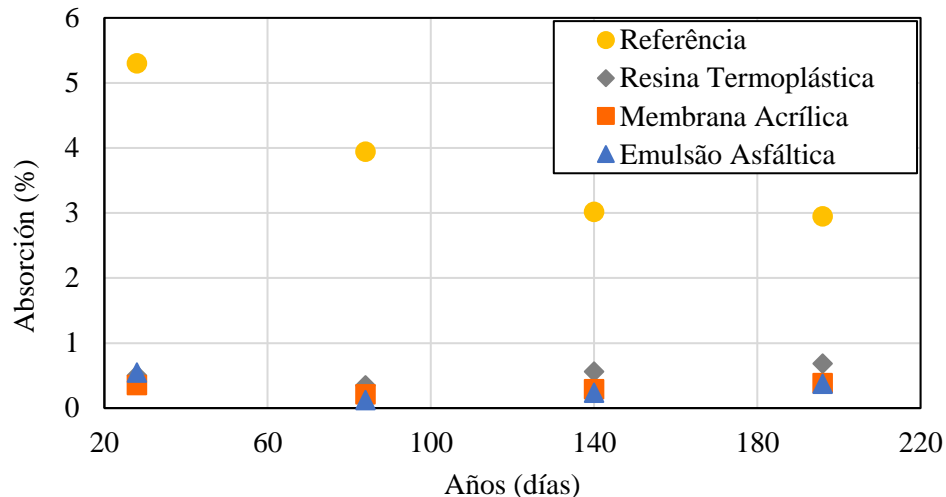


Figura 11. Resultado del ensayo de absorción por inmersión luego del envejecimiento acelerado.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron apuntar las siguientes conclusiones:

- En ensayo de estanqueidad indicó un comportamiento semejante entre todas las series estudiadas, no pudiendo ser observado, en el período indicado por la NBR 15575 (ABNT, 2013), infiltración, percolación o cualquier otro indicio de falla en las tres series observadas;
- El ensayo de absorción por inmersión más una vez indicó comportamientos semejantes entre los productos estudiados, todavía, en este caso, fue posible indicar, al final del ensayo, el mejor desempeño de la membrana acrílica, siendo la absorción del material igual a 0,35%;
- El ensayo de absorción por ascenso capilar indicó mejor desempeño para la resina termoplástica, confirmando su indicación para el uso en rodapiés;
- Las imágenes termográficas ayudaron en la visualización de la percolación del agua para el interior de las probetas, confirmando el mejor desempeño (temperaturas superiores) para las series impermeabilizadas;
- Finalmente, el envejecimiento acelerado fue sensible para indicar un cambio de comportamiento entre las series impermeabilizadas, todavía, al final del ensayo el desempeño de esas todavía es muy superior (cerca de 6 veces) a la serie referencia. Se recomienda el acompañamiento de estos materiales por un período mayor de estudio, a fin de verificar la eficiencia de los mismos y confirmar la vida útil de ellos en servicio.

## 5. AGRADECIMIENTOS





Los autores agradecen a las agencias brasileñas CNPq, Capes y Fundación Araucária por el apoyo financiero, a la Universidad Federal del Paraná (UFPR), al Programa de Post grado en Ingeniería de Construcción Civil (PPGECC), al Centro Universitario UNIFACEAR y la concretera NOVAMIX por toda la ayuda dada a este estudio.

## 6. REFERENCIAS

- 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](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.

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

P. Garcés<sup>1\*</sup> , M. A. Climent , J. Carmona , M. J. Sánchez de Rojas 

\*Autor de Contacto: [pedro.garces@ua.es](mailto:pedro.garces@ua.es)

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

Recepción: 21/10/2020 | Aceptación: 03/12/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Garcés, P. Climent, M. A., Carmona, J., Sánchez de Rojas, M. J. (2021), "Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 48 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.518>

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

#### Contribución de cada autor

En este trabajo los autores P. G. y M. A. C. contribuyeron con la idea original de la investigación, la dirección conjunta del proyecto, la dirección conjunta de las tesis doctorales de J.C. y M. J. S. d. R., discusión de resultados y la escritura del trabajo. Los autores J. C. y M. J. S. d. R. contribuyeron con la realización de la experimentación, la recolección de datos y la participación en la discusión de resultados.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

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

### **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 aos armaduras, 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.

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

#### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCION

Uno de los principales problemas que puede afectar al hormigón armado es la corrosión del acero embebido. Para devolver a su estado inicial a una estructura de hormigón armado (EHA) que ha sufrido corrosión de su armadura, es necesario reparar los daños producidos. Las reparaciones tradicionales consisten básicamente en la eliminación del hormigón dañado y posiblemente contaminado por cloruros, la limpieza adecuada de la armadura, y en ocasiones sustitución, y la posterior reposición del hormigón eliminado.

Algunas técnicas electroquímicas han sido utilizadas con éxito para la protección y remediación de la corrosión de la armadura en EHA. Todas esas técnicas están basadas en la disminución del potencial eléctrico del acero (Page, 1992; Mietz, 1998; Andrade, et al, 1998; Tritthart, 1998; Pedferri y Bertolini, 2000; Bertolini, 2004; Polder, 2005). Este efecto puede ser obtenido por conexión a un metal menos noble, como en la técnica por protección catódica (PC) por ánodo de sacrificio, o por conexión al polo negativo de una fuente de alimentación, como en la aplicación de la PC por corriente impresa (Page, 1997; Pedferri, 1996; Polder, 1998; Bertolini, et al, 1998; Glass y Chadwick, 1994). El objetivo principal de la PC es detener la corrosión del acero de refuerzo, cuando está ya se ha iniciado. Existe una variante de la PC denominada prevención catódica (PreC), según Pedferri et al. (Pedferri, 1996; Polder, 1998; Bertolini, et al, 1998; Glass y Chadwick, 1994). El objetivo de la PreC es prevenir el inicio de la corrosión del acero en estructuras nuevas. Por otra parte, existen técnicas electroquímicas destinadas a cambiar las condiciones predominantes de corrosión de las estructuras mediante la disminución del contenido de cloruros, como la técnica de extracción electroquímica de cloruros (EEC). Así no es necesario sustituir el hormigón contaminado y, una vez extraída una cantidad suficiente de cloruros, se aumenta la vida útil de la estructura (Slater, et al, 1976; Vennesland, et al, 1986; Hansson y Hansson, 1993; Elsener, et al, 1993). Un aspecto importante en relación a la aplicación de esta técnica es el efecto de la disposición de las armaduras sobre la eficiencia de la EEC. Sánchez de Rojas et al, concluyen que la eficiencia en la extracción depende de la disposición del refuerzo. Pero siempre se puede extraer cloruros entre dos capas de armaduras de acero (Garcés, et al, 2006; Sánchez de Rojas, et al, 2006). Por otra parte, se han probado diferentes soluciones para el ánodo externo, como la utilización de una malla rígida de Ti-RuO<sub>2</sub> y un fieltro de grafito, ambos envueltos con polipropileno en un sistema tipo sándwich. Concluyéndose que si se tiene suficiente cuidado en evitar un contacto defectuoso entre la capa de fieltro o la malla de Ti-RuO<sub>2</sub> y la superficie del elemento constructivo la eficiencia obtenida debe ser similar (Climent, et al, 2006). Finalmente, también en relación al ánodo externo, el avance más importante en los últimos años se ha centrado en el estudio de la viabilidad del uso de una pasta de cemento conductora (PCC), basada en mezclas de cemento con diferentes materiales carbonosos, como recubrimiento anódico de la superficie del hormigón para aplicaciones electroquímicas en EHA (Pérez, et al, 2010; Carmona, et al, 2015a; Cañón, et al, 2013; Del Moral, et al, 2013; Carmona, et al, 2015b; Climent, et al, 2016; Carmona, et al, 2017; Climent, et al, 2019). Se comprobado que las eficiencias de estos ánodos, en relación a la extracción de Cl<sup>-</sup>, fueron similares a las obtenidas con un ánodo tradicionalmente usado en EEC, tal como la malla de Ti-RuO<sub>2</sub> (Pérez, et al, 2010). La pasta de cemento conductora es más versátil como ánodo pues permite una mayor facilidad de aplicación en diferentes tipos de superficie y además ofrece la posibilidad de su reutilización. Una de las posibilidades más atractivas ofrecida por estas capas conductoras anódicas es la posibilidad de la aplicación combinada sucesiva de EEC y PC, sin cambiar el ánodo (Carmona, et al, 2015a; Climent, et al, 2019). Esta combinación de tratamientos puede ser conveniente en el caso de estructuras muy contaminadas con iones Cl<sup>-</sup>, y cuyo nivel de contaminación ambiental por cloruros se espere que se mantenga alto en el futuro, por ejemplo, en el caso de EHA expuestas a ambientes marinos agresivos. En estos casos puede ser considerado necesario primero reducir el contenido de Cl<sup>-</sup> por aplicación de la EEC, y después mantener el acero

protegido mediante un tratamiento permanente de PC, sin la necesidad de aplicar una densidad de corriente muy alta durante la aplicación de la PC, y por tanto reduciendo el riesgo de mal funcionamiento del ánodo debido a la acidificación producida en la superficie.

Las condiciones de operación de las citadas técnicas electroquímicas difieren en cada caso (Carmona, et al, 2015a; Cañón, et al, 2013; Del Moral, et al, 2013; Carmona, et al, 2015b; Climent, et al, 2016; Carmona, et al, 2017; Climent, et al, 2019). La densidad de corriente típica en las aplicaciones de la técnica de EEC se sitúa en el rango de 1-5 A/m<sup>2</sup>, mientras que la densidad de carga eléctrica pasada se sitúa habitualmente entre 1x10<sup>6</sup> y 5x10<sup>6</sup> C/m<sup>2</sup>. Desde un punto de vista electroquímico la densidad de corriente debe ser definida refiriéndola a la superficie del electrodo, es decir la superficie del cátodo, el acero de refuerzo. Sin embargo, en el campo de las aplicaciones en ingeniería a veces es difícil saber con exactitud el área del acero de refuerzo. En consecuencia, muchas veces la densidad de corriente es referida a la superficie expuesta de hormigón, la cual, en el caso de sistemas de capas anódicas coincide con el área del ánodo. Por otra parte, la técnica de protección catódica PC aplica típicamente valores de densidades de corriente entre 5 y 20 mA/m<sup>2</sup>, mientras que la PreC necesita solamente 1-3 mA/m<sup>2</sup>. No obstante, en el caso de la PC la densidad de corriente necesaria para conseguir una protección efectiva del acero es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de Cl<sup>-</sup> en el hormigón.

A continuación, se expone el programa experimental y principales resultados obtenidos en la aplicación combinada y sucesiva de EEC y PC, sin cambiar el ánodo, constituido por una pasta de cemento conductora. Esta combinación de tratamientos puede ser conveniente en el caso de estructuras muy contaminadas con iones Cl<sup>-</sup>, y cuyo nivel de contaminación ambiental por cloruros se espere que se mantenga alto en el futuro, por ejemplo, en el caso de EHA expuestas a ambientes marinos agresivos.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Metodología

Las probetas de ensayo destinadas a ser ensayadas mediante PC o EEC+PC fueron preparadas con hormigón al que se añadió iones Cl<sup>-</sup> en el agua de amasado. En la Tabla 1 se muestra la nomenclatura de las probetas para la aplicación de las técnicas electroquímicas. Todas las probetas fueron sometidas al mismo régimen de contaminación de Cl<sup>-</sup> durante las 24 semanas que duraron los tratamientos de PC: rociado semanal de 65 ml de una disolución de NaCl 0,5 M sobre la superficie del hormigón o sobre la superficie de la capa anódica, a fin de simular la contaminación continua de cloruros debido, por ejemplo, a la exposición de la EHA a un ambiente marino muy agresivo como se ha mencionado anteriormente.

Tabla 1. Nomenclatura de las probetas para la aplicación de las técnicas electroquímicas

Probeta	No. probetas	Contenido inicial de Cl <sup>-</sup> (% referido masa cemento)	Tratamiento electroquímico aplicado
P	1	0%	-
R	1	2%	-
ER	1	2%	EEC
A	1	2%	PC
EA	1	2%	EEC + PC

### 2.2. Probetas de hormigón reforzado

Las probetas fueron elementos prismáticos de hormigón reforzado, con unas dimensiones de 18x18x8 cm<sup>3</sup>, que fueron reforzados con una cuadrícula de 16x16 cm<sup>2</sup> compuesta de 6 barras de acero (5 mm de diámetro) soldadas simétricamente formando cuadrados de 5 cm de diámetro.



Dicha cuadrícula fue situada a 2 cm de la cara superior donde se sitúa el ánodo de grafito-cemento. El sistema usado para conectar el refuerzo (cátodo) con el polo negativo de la fuente de alimentación fue a través de unos conectores de cobre aislados con plástico, atornillados a la armadura, véase la Figura 1.

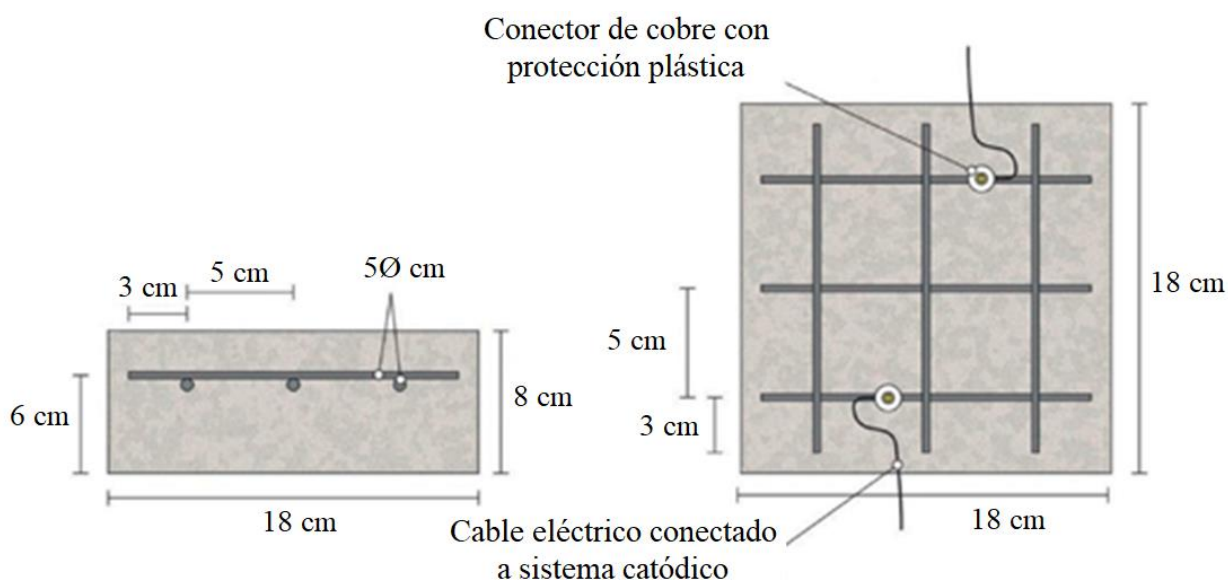


Figura 1. Esquema del refuerzo de las probetas y la conexión del sistema catódico (refuerzo de acero). Adaptado de (Carmona, et al, 2015a).

La dosificación del hormigón fue la que se muestra en la Tabla 2. Se preparó una mezcla con un 2% de Cl<sup>-</sup> (añadido al agua de amasado a partir de NaCl) relativos a la masa de cemento para probetas usadas en las aplicaciones de PC o en los tratamientos combinados de (EEC+PC), ver Tabla 2. Una vez que los moldes fueron retirados, las probetas fueron curadas en un ambiente de HR del 95-98% durante 28 días. Las características resistentes del hormigón endurecido fueron las siguientes: Resistencia a compresión 37,8 N/mm<sup>2</sup> (AENOR, 2009), porosidad 11,1% (UNE, 2014) y densidad 2,38 T/m<sup>3</sup> (UNE EN, 2009).

Tabla 2. Dosificación del hormigón para la preparación de las probetas de ensayo

Material	Dosificación
Cemento Portland CEM I 42,5 R	250 kg/m <sup>3</sup>
Relación agua/cemento	0,65
Árido calizo (tamaño máximo 12 mm)	1890 kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	2,50 kg/m <sup>3</sup>
NaCl	3,3% (2% Cl <sup>-</sup> referido a masa de cemento)

### 2.3 Detalles experimentales de los ensayos electroquímicos

Todos los ensayos electroquímicos fueron desarrollados utilizando como ánodo una pasta de cemento conductora, obtenida al fraguar una pasta de cemento-grafito mezclando ambos componentes al 50%-50% en masa. La relación agua/sólido de la pasta fue 0,8. La resistividad de la pasta de cemento-grafito fue medida mediante el método de las 4 puntas, rindiendo un valor de 1,5 Ω m (Galao, et al, 2014). A continuación, se practicaron dos ranuras a lo largo del recubrimiento anódico, sin llegar a la superficie del hormigón, para recibir en cada una de ellas una barra de grafito de 2 mm de diámetro para conectarlas al polo positivo de la fuente eléctrica. Estas barras se

recubrieron con pasta de grafito-cemento para evitar cualquier contacto entre las mismas y el hormigón.

La medida del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y de todos los potenciales de electrodo se realizó utilizando electrodos de referencia de Ag/AgCl. Estos electrodos se alojaron en orificios perforados desde la superficie expuesta de la probeta de hormigón (la que soporta el ánodo de grafito-cemento) hasta la vecindad de la barra de refuerzo. Para este propósito, los orificios se enfundaron con un tubo de plástico y fueron rellenados con una solución acuosa de KOH 0.2 M, a fin de simular las condiciones físico-químicas de la solución intersticial del hormigón.

Dos de las probetas fueron usadas para determinar la eficiencia del proceso de EEC. Se extrajeron testigos de las mismas, y se determinaron sus perfiles de contenido de cloruros, en un caso antes y en otro después de la aplicación de la EEC. Las eficiencias obtenidas al aplicar EEC fueron calculadas como porcentajes de reducción del contenido inicial de cloruros. La obtención del perfil de contenido de cloruros antes y después de los ensayos de EEC permite calcular las eficiencias locales y totales. Los perfiles de  $\text{Cl}^-$  fueron obtenidos siguiendo esencialmente los procedimientos recomendados por RILEM (Vennesland, et al, 2013). Se extrajeron testigos cilíndricos de 95 mm de diámetro y 20 mm de altura (hasta la profundidad de la malla de refuerzo). A partir de estos testigos se obtuvieron muestras de polvo a diferentes profundidades (cada 2 mm) desde la superficie. De esta forma se obtuvieron 10 muestras de polvo de hormigón de cada testigo, permitiendo describir con suficiente detalle el perfil de contenido de  $\text{Cl}^-$ . Los análisis químicos del contenido de cloruros se realizaron mediante valoración potenciométrica (Climent, et al, 1999; Climent, et al, 2004). Todos los valores de contenido de cloruros fueron expresados en este trabajo como % de  $\text{Cl}^-$  relativos a la masa de cemento.

La técnica de EEC fue aplicada galvanostáticamente con una densidad de corriente de  $2 \text{ A/m}^2$  y una densidad de carga pequeña, solo de  $1,5 \text{ MC/m}^2$  relativo a la superficie del hormigón ( $2,6 \text{ MC/m}^2$  relativo a la superficie del acero). El electrolito externo en contacto con el ánodo fue agua potable.

La técnica de PC fue aplicada galvanostáticamente con densidades de corriente de  $15 \text{ mA/m}^2$  (relativo a la superficie del hormigón que es la misma que la del ánodo) en dos probetas, una de ellas previamente tratada con EEC y la otra sin tratamiento previo. El valor de densidad de corriente relativo a la superficie de las barras de acero fue de  $25,5 \text{ mA/m}^2$  para el tratamiento de PC.

Ambas técnicas, EEC y PC, fueron aplicadas en condiciones de laboratorio ( $20^\circ\text{C}$  y HR 60%). Los datos de potenciales fueron registrados utilizando un sistema de adquisición de datos.

La aplicación de PC consistió en 2 fases:

- Fase 1: Primeras 24 semanas. El tratamiento mencionado de PC fue continuamente aplicado durante las 13 primeras semanas. Entonces, la corriente eléctrica se interrumpió durante 4 semanas y después se reanudaron los tratamientos hasta el final. La contaminación con cloruros (rociado semanal de 65 ml de una disolución de NaCl 0,5 M sobre la superficie del hormigón) fue aplicada continuamente, incluso durante las semanas en que se cortó la corriente.

Mientras se aplicaba la técnica de PC, fueron medidos algunos parámetros electroquímicos. Durante los periodos de paso de corriente, el voltaje de alimentación de cada probeta,  $\Delta E_{\text{feed}}$ , fue obtenido como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, y los potenciales individuales tanto anódico como catódico,  $E_a$  y  $E_c$  respectivamente, fueron medidos frente al electrodo de referencia de Ag/AgCl. Finalmente, a fin de valorar la eficiencia de la PC como condiciones reales de mantenimiento de las condiciones de protección del acero el criterio “100mV de caída” fue utilizado, como se especifica en ISO 1296:2012 (ISO, 2012). Este criterio ha sido ampliamente utilizado para este propósito por diferentes investigadores (Glass, et al, 2001; Liu y Shi, 2012; Dugarte, et al, 2015; Christodoulou, et al, 2010). El método consiste en obtener la caída de potencial ( $\Delta E_{\text{decay}}$ ) que es la diferencia entre el  $E_c^{4h}$  (El valor del  $E_c$  4 horas después del corte de corriente),

y el potencial catódico 1s después de cortar la corriente  $E_c^{i0}$  (denominado habitualmente potencial de “instant-off”). El valor mínimo de esta caída debe ser de 100 mV para una adecuada protección del acero frente a la corrosión.

Una vez finalizado el proceso de aplicación de las técnicas electroquímicas, se extrajeron testigos de todas las probetas ensayadas, y se obtuvieron sus respectivos perfiles de contenido de cloruros. Esto se hizo con el propósito de evaluar el efecto neto de los tratamientos electroquímicos sobre la cantidad de iones  $Cl^-$  captados por las probetas de hormigón armado durante la exposición continua a un ambiente muy agresivo.

- Fase 2. Al final de la fase 1 se observó que todas las probetas habían perdido las condiciones de protección del acero, evidenciado por unos valores de  $\Delta E_{decay}$  menores de 100mV. Entonces se decidió empezar esta segunda fase con el objetivo de recuperar las condiciones de protección del acero a base de ajustar la densidad de corriente de los tratamientos de PC. El procedimiento consistió en aumentar progresivamente la densidad de corriente durante 4 semanas, empezando por el valor de 20 mA/m<sup>2</sup>, hasta conseguir de nuevo alcanzar condiciones de protección ( $\Delta E_{decay} \geq 100$  mV).

### 3. RESULTADOS Y APLICACIÓN

#### 3.1 Aplicación de la EEC

Dos probetas de hormigón reforzado fueron sometidas a la aplicación de la técnica de EEC antes de empezar la primera fase de aplicación de los tratamientos de PC. Una vez acabado el proceso de EEC con los parámetros establecidos, se obtuvieron los perfiles de contenido de  $Cl^-$ , correspondientes a los estados antes y después del tratamiento de EEC. Los testigos extraídos estaban situados en la zona central de la superficie de la probeta. Por el diseño de la misma y situación del ánodo y el cátodo, el campo eléctrico aplicado es homogéneo en toda la superficie. Las eficiencias locales, entendidas como porcentajes de  $Cl^-$  extraídos, están representadas en la Figura 2. La media de  $Cl^-$  extraídos fue del 51% del contenido inicial, es decir el contenido residual de  $Cl^-$  en el hormigón después de la EEC fue aproximadamente del 1% referido a la masa de cemento. Esto indica un buen comportamiento del proceso de EEC aplicado a un hormigón de cemento portland utilizando como ánodo una capa de pasta de cemento conductora mediante adición de grafito PCC, para una relativamente baja densidad de carga aplicada,  $1,5 \times 10^6$  C/m<sup>2</sup> relativo a la superficie del hormigón. Este resultado puede ser comparado con el 41% de eficiencia obtenido para un elemento muy similar de hormigón reforzado, con el mismo contenido inicial de  $Cl^-$ , sometido a un tratamiento de EEC, usando como ánodo una malla de Ti-RuO<sub>2</sub>, y pasando una densidad de carga total de  $1 \times 10^6$  C/m<sup>2</sup> (Pérez, et al, 2010).

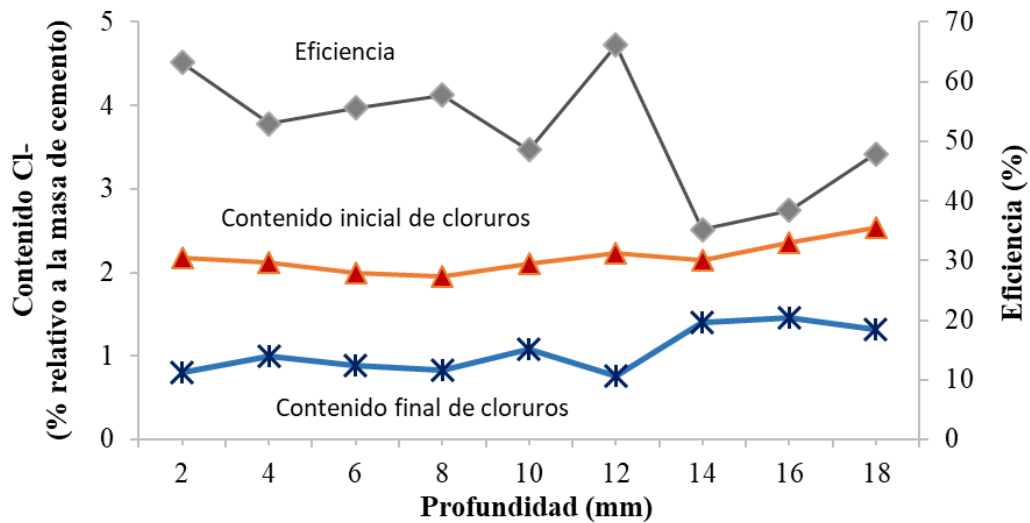


Figura 2. Perfiles de contenido de Cl<sup>-</sup> (eje Y1), correspondientes a los estados antes y después del tratamiento de EEC. En el Y2 se representan las eficiencias locales. Adaptada de (Carmona, et al., 2015a).

### 3.2 Primera fase de los tratamientos electroquímicos.

En esta sección se describen los resultados de los ensayos llevados a cabo para investigar el comportamiento de los ánodos de PCC durante los tratamientos electroquímicos protectivos en EHA afectados por corrosión de la armadura debido a la contaminación severa con Cl<sup>-</sup>, siendo estos la PC, y el tratamiento combinado de EEC+PC.

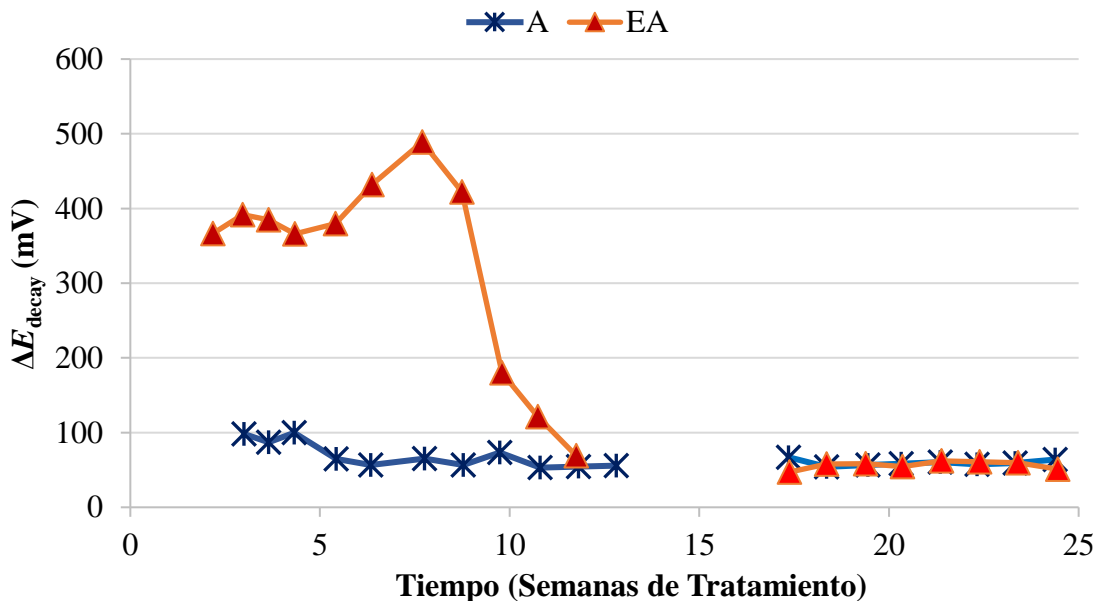


Figura 3. Evolución del  $\Delta E_{decay}$  durante el tratamiento de PC. A: PC; EA: EEC + PC. Todos ellos sometidos a un proceso de contaminación de Cl<sup>-</sup> durante 24 semanas. Los tratamientos electroquímicos fueron interrumpidos desde la semana 13 a la 17 Adaptada de (Carmona, et al., 2015a).

Para verificar la efectividad de los tratamientos de PC y de la aplicación combinada de EEC+PC en la protección frente a la corrosión del acero de refuerzo, fue utilizado el criterio de “caída de 100 mV” (ISO, 2012), como se establece en la sección 2.4. La Figura 3 muestra la evolución de

los valores del  $\Delta E_{\text{decay}}$  para los valores de las probetas referidas en la Tabla 1, durante las 24 semanas del experimento. Los valores de  $\Delta E_{\text{decay}}$  de la probeta A, tratada únicamente con PC, prácticamente nunca alcanzaron el límite de 100 mV. Parece que la aplicación de una densidad de corriente de 15 mA/m<sup>2</sup> no fue suficiente para proveer protección al acero en estas condiciones tan agresivas: contenido inicial de Cl<sup>-</sup> del 2% más la contaminación continua con sal (rociado semanal de la superficie de la capa anódica de PCC). Con respecto a la probeta EA (EEC+PC) las condiciones de protección del acero fueron mantenidas durante 11 semanas debido a la corriente aplicada, a pesar de la contaminación externa con Cl<sup>-</sup>. La aplicación de PC con una densidad de corriente de 15 mA/m<sup>2</sup>, relativas a la superficie del hormigón, fue capaz de mantener las condiciones de protección del acero siempre que el contenido inicial de Cl<sup>-</sup> de la probeta fuese de hasta el 1%.

Por lo tanto, en el caso de que el contenido inicial de Cl<sup>-</sup> de la probeta fuese de alrededor del 2%, se necesitaría una densidad de corriente mayor para alcanzar las condiciones de protección (Pedferri, 1996). Estas observaciones corroboran la principal hipótesis de la presente investigación, esto es en casos de EHA con una contaminación alta de Cl<sup>-</sup> sometida a su vez a un ambiente agresivo de cloruros como en determinados ambiente marinos, sería ventajoso aplicar sucesivamente un tratamiento inicial de EEC para reducir el contenido de Cl<sup>-</sup>, y entonces mantener las condiciones de protección del acero mediante la ampliación de un tratamiento continuo de PC, sin necesidad de utilizar una densidad de corriente muy alta, que eventualmente puede afectar al buen comportamiento del sistema anódico (Carmona, et al, 2015a). Estos tratamientos combinados, EEC+PC, serían más convenientemente implementados con el uso como ánodos de recubrimientos conductores de PCC, puesto que el mismo ánodo puede servir para el tratamiento inicial de EEC y para el tratamiento posterior de PC.

Tabla 3. Contenido final medio de cloruros (expresados en % de Cl<sup>-</sup> relativos a la masa de cemento) al final de las 24 semanas de exposición a una carga severa de Cl<sup>-</sup>

<b>Probeta</b>	<b>Contenido inicial de Cl<sup>-</sup> (% referido masa cemento)</b>	<b>Tratamiento electroquímico previo a las 24 semanas de primera fase</b>	<b>Tratamiento electroquímico durante las 24 semanas de la primera fase</b>	<b>Contenido final medio (*) (% referido masa cemento)</b>
P	0%	-	-	4,93%
R	2%	-	-	6,08%
ER	2%	ECE	-	4,26%
A	2%	-	PC	5,39%
EA	2%	ECE	PC	3,41%

(\*) El contenido final de Cl<sup>-</sup> fue calculado como el valor medio de los encontrados en el perfil de contenido de Cl<sup>-</sup> en la capa de recubrimiento de hormigón (20 mm de espesor).

Al final de la fase 1 todas las probetas de hormigón reforzado habían alcanzado un grado muy alto de contaminación con Cl<sup>-</sup>, como puede apreciarse en la Tabla 3. Sin embargo, se pueden hacer algunas comparaciones para los diferentes casos. Por ejemplo, que las probetas tratadas con EEC + PC (EA) durante la fase 1, han experimentado menor ingreso de Cl<sup>-</sup> que la probeta de referencia ER, la cual después de la aplicación de EEC fue mantenida sin tratamiento alguno durante la fase 1. Esto representa una evidencia adicional del “efecto barrera de penetración de cloruros”, mencionado por Pedferri (Pedferri, 1996), como uno de los efectos secundarios beneficiosos, puesto que la polaridad del campo eléctrico induce un efecto repelente de los iones negativos, y por lo tanto reduce los cloruros captados por el hormigón en un ambiente agresivo de cloruros como es el ambiente marino.

### 3.3 Segunda fase de tratamientos electroquímicos

Dado que después de 24 semanas de la fase 1, incluyendo el periodo de interrupción de la corriente entre la semana 13 y 17, el acero de refuerzo en todas las probetas de hormigón había perdido completamente sus condiciones de protección, y quedaba demostrado que la PC de  $15 \text{ mA/m}^2$  era incapaz de restaurar las condiciones de protección, Figura 3, entonces se dio comienzo a la fase 2. La contaminación de  $\text{Cl}^-$  externa dejó de aplicarse puesto que todas las probetas habían alcanzado un contenido muy alto de  $\text{Cl}^-$ , ver Tabla 3. En estas condiciones, la PC fue aplicada con mayores valores de densidad de corriente. La cuestión fue si era posible recuperar las condiciones de protección del acero aumentando la densidad de corriente hasta un valor apropiado. Al inicio de esta segunda fase, la densidad de corriente fue establecida en  $20 \text{ mA/m}^2$ . Después de 4 semanas aplicándose PC, el valor umbral de  $100 \text{ mV}$  de  $\Delta E_{\text{decay}}$  no fue alcanzado, es decir que las condiciones de protección no fueron obtenidas, Figura 4. Tampoco se alcanzó el objetivo en un segundo intento a  $25 \text{ mA/m}^2$  (Los datos no se muestran en la Figura 4). Finalmente, una tercera etapa de  $40 \text{ mA/m}^2$  fue llevada a cabo. En este caso, después de 4 semanas, la regla de los  $100 \text{ mV}$  de  $\Delta E_{\text{decay}}$  fue conseguida para las probetas EA, A y B.

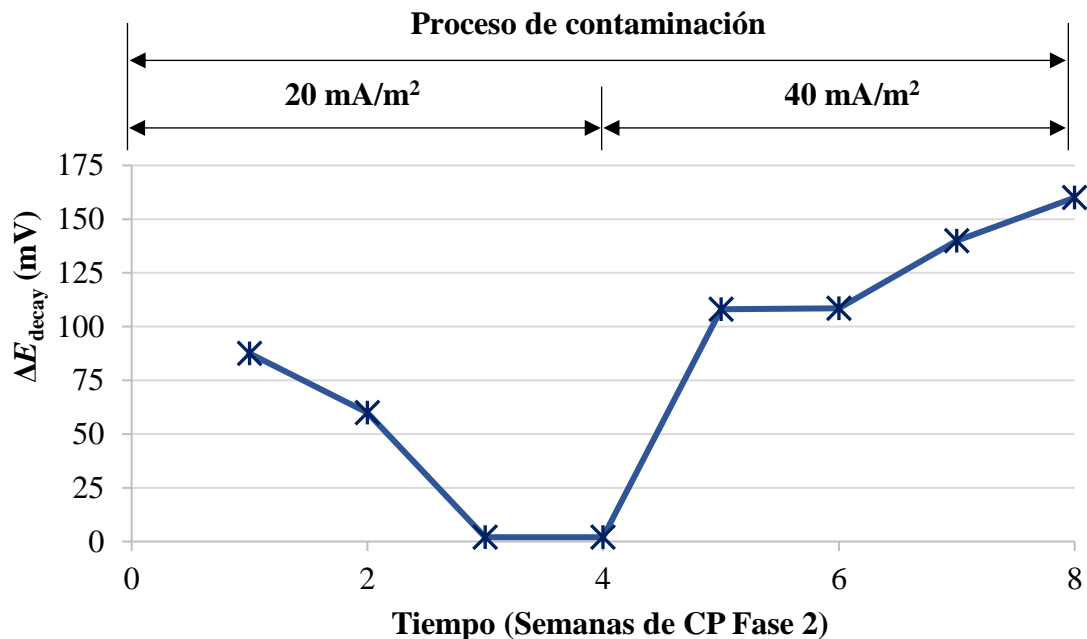


Figura 4. Evolución del  $\Delta E_{\text{decay}}$  para la probeta EA (EEC+PC) durante la fase 2. Primera etapa de 4 semanas donde se aplicaron  $20 \text{ mA/cm}^2$ , y segunda etapa donde se aplicaron  $40 \text{ mA/cm}^2$ .

Además, las condiciones de protección fueron verificadas con medidas de las diferencias en los valores del potencial de despolarización 7 días después del corte de corriente (ISO, 2012), más restrictiva, donde se deben alcanzar valores superiores a los  $150 \text{ mV}$  de  $\Delta E_{\text{decay}}$  después de estos 7 días; registrándose un valor de  $209 \text{ mV}$  para EA.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo apuntan a que es posible el uso de una pasta conductora de cemento-grafito, recubriendo la superficie del elemento de hormigón reforzado, como ánodo en la aplicación de tratamientos sucesivos de técnicas electroquímicas.

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 de 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 la EHA.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (código de subvención MAT2009-10866) y por la Generalitat Valenciana (código de subvención PROMETEO/2013/035). También queremos agradecer la financiación recibida de la Agencia Estatal de Investigación Española (código de subvención BIA2016-80982-R) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (código de subvención BIA2016-80982-R).

## 6. REFERENCIAS

- 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<sup>a</sup>. 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*, Svolvær, 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.

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

R. T. Vasconcelos Fernandes<sup>1</sup>, A. Fonseca Cabral<sup>1</sup>, G. C. Batista Dantas<sup>1\*</sup>,  
V. N. Varela Tinoco<sup>1</sup>, B. D. Azevedo da Silveira<sup>1</sup>, A. M. Sousa Junior<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [gerbeson\\_dantas@hotmail.com](mailto:gerbeson_dantas@hotmail.com)

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

Recepción: 30/10/2020 | Aceptación: 16/12/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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%).

**Palabras clave:** inspección de carreteras; defectos en pavimentos flexibles; DNIT 006/2003; metodología alternativa; aviones no tripulados.

**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), " Mapeo de manifestaciones patológicas en pavimento asfáltico por medio del uso de drones ", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 61 – 72, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.521>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rua Francisco Mota Bairro, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoró - RN, 59625-900, Brasil.

#### Contribución de cada autor

Este trabajo consistió en los siguientes pasos: diseño de la investigación, relevamiento bibliográfico, recolección de datos, análisis de los resultados obtenidos en el campo, redacción del manuscrito, traducción, revisión del texto y evaluación de la investigación.

El autor Rogerio Taygra Vasconcelos Fernandes participó del artículo en las etapas de diseño de la investigación (50%), relevamiento bibliográfico (50%), análisis de resultados obtenidos en campo (50%), redacción del manuscrito (33,33%) y evaluación de la investigación (25%). La autora Adriene Fonseca Cabral fue la responsable de las etapas de levantamiento bibliográfico (25%), recolección de datos (90%), análisis de resultados obtenidos en campo (50%) y redacción del manuscrito (33,33%). El autor Gerbeson Carlos Batista Dantas participó en la etapa de relevamiento bibliográfico (25%), redacción del manuscrito (33,33%), traducción (20%) y revisión del texto (50%). El autor Gerbeson Carlos Batista Dantas participó en la etapa de relevancia bibliográfica (25%), redacción del manuscrito (33,33%), traducción (20%) y revisión del texto (50%). El autor Brenno Dayano Azevedo Da Silveira participó en la etapa de diseño de la investigación (25%) y evaluación de la investigación (50%). El autor Almir Mariano Sousa Junior participó en la etapa de diseño de la investigación (25%), revisión del texto (25%) y evaluación de la investigación (25%).

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

## Inspeção de manifestações patológicas em edifícios utilizando câmera termográfica integrada ao veículo aéreo não tripulado (VANT): uma pesquisa documental

### 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.

**Palabras clave:** VANT; câmera térmica; inspeção predial.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera es un servicio fundamental para el desarrollo económico de Brasil, incidiendo directamente en aspectos de producción y consumo, ya que el país tiene su infraestructura orientada al modal vial (Andrade; Maia; Lima Neto, 2015). Sin embargo, este modal representa el 61% del transporte de carga en Brasil y es el principal sistema de desplazamiento de pasajeros. En cuanto a los aspectos sociales y económicos, este sector es responsable de la generación de más de 1,5 millones de empleos directos y aporta a nivel nacional el 12,7% del Producto Interno Bruto de los servicios no financieros (CNT, 2017).

A pesar de su importancia, históricamente se ha prestado poca atención al mantenimiento de la infraestructura de las carreteras brasileñas, lo que se refleja en la depreciación de la red vial, situación que se ha agudizado con la crisis económica que atraviesa el país desde 2013 (CNT, 2017). Como consecuencia de la falta de inversiones, se estima que más del 50% de las carreteras presentan algún tipo de patología, y de estas, el 19% se encuentran en un estado general de mala o muy mala conservación. Según el Foro Económico Mundial (FEM), Brasil ocupa el puesto 111 entre 138 países evaluados en términos de calidad de infraestructura vial (CNT, 2017; FEM, 2016). Entre las principales razones del deterioro de la red vial brasileña, el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT, 2011) atribuye la ausencia de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP), que permitiría lograr la mejor aplicación posible de los recursos públicos disponibles y ofrecer transporte por carretera seguro, compatible y económico con la creciente demanda brasileña. Sin esto, existe la adopción de diseños inadecuados para los caminos, elaborados sin relevamiento detallado del pavimento o la situación en la que se encuentra el terreno (Viera, et al 2016). La base de un SGP eficiente es la adopción de métodos adecuados para evaluar los pavimentos, a través de los cuales es posible verificar la necesidad de mantenimiento o reconstrucción de la carretera, así como determinar si se construyó de acuerdo con las especificaciones del proyecto (Haas; Hudson, 1978; Viera, et al 2016).

La valoración superficial de los pavimentos se suele realizar siguiendo la norma DNIT 006/2003 - PRO, que utiliza el método Global Gravity Index (IGG). Este método permite analizar objetivamente el nivel de deterioro de un piso según la incidencia de defectos superficiales, indicando sus condiciones de conservación y ayudando a tomar decisiones sobre las intervenciones necesarias. Si bien el IGG se considera un método eficaz y está muy extendido en el entorno técnico, presenta como desventaja la necesidad de realizar levantamientos a pie, lo que hace que su aplicación sea lenta y costosa para su aplicación en grandes áreas.

Una alternativa para solucionar este problema es el uso de los denominados vehículos aéreos no tripulados (UAV), que pueden volar automáticamente o ser piloteados por medios electrónicos y computacionales. Este equipo fue diseñado para fines militares, inicialmente utilizado en misiones que son demasiado peligrosas para ser realizadas por seres humanos (Resende, 2015). Sin embargo, en los últimos años ha ido ganando protagonismo entre las intervenciones civiles, configurando una tecnología emergente en la ingeniería civil con aplicaciones que van desde la inspección de obras, hasta la inspección de estructuras en entornos de alto riesgo (Melo, 2016).

Con respecto a la aplicación de vehículos aéreos no tripulados en la infraestructura de transporte, sus sensores integrados son una fuente de información nueva y económica e incluso pueden ayudar en los esfuerzos para mantener la carretera (Branco, 2016; Nishar et al., 2016). A pesar de esto, se han realizado pocos estudios con esta tecnología, especialmente como herramienta para evaluar los daños viales.

Así, considerando la necesidad de optimizar el proceso de evaluación vial en apoyo al SGP y el potencial que ofrecen los UAV, es fundamental desarrollar metodologías que permitan su uso de manera eficiente y técnicamente adecuada (Breen et al., 2015; Nishar et al., 2016). Para ello, este trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad del uso de Drones para el mapeo e inspección de

patologías en pavimentos asfálticos, comparando y comparando sus resultados con el método de análisis tradicional.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

Como unidad muestral del presente estudio, un tramo de asfalto de una sola vía de aproximadamente 0,5 km de longitud, que da acceso al campus de la Universidad Federal Rural del Semiárido / UFERSA, en el municipio de Angicos, estado de Río Grande. do Norte - Brasil (Figura 1). Este tramo, aunque de pequeña extensión, resultó idóneo para la realización del estudio debido al gran número de manifestaciones patológicas en el pavimento.

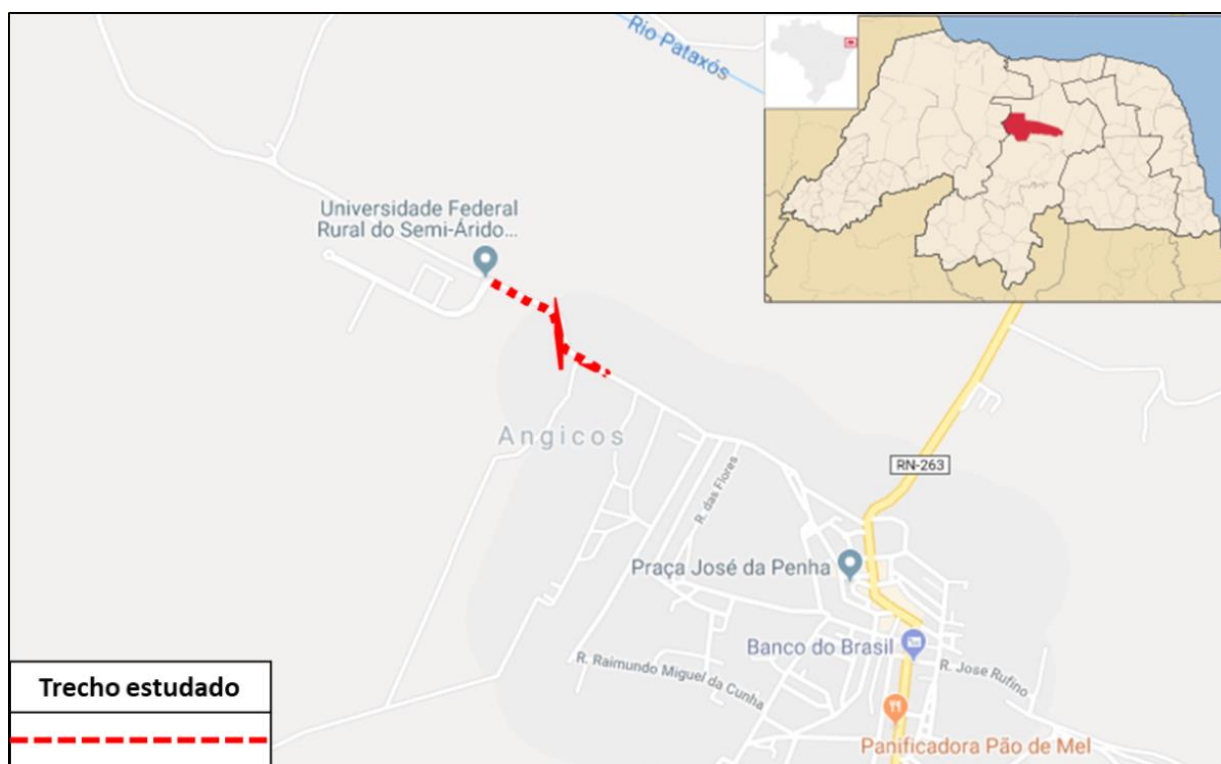


Figura 1. Área de estudio (Lat. 5°39'17.32"S; Lon. 36°36'37.48"O).

### 2.2 Levantamiento das patologías pelo método tradicional (referencia)

Para relevar las patologías existentes en el área de estudio se establecieron parcelas de muestreo cada 20 m (en manos alternas), cada 6 m de largo, según establece la Norma DNIT 006/2003 - PRO (Figura 2). En total, se consideraron 20 estaciones, en las que se anotaron sus defectos, teniendo en cuenta la sección del terreno y los tipos de manifestación patológica, distinguiendo entre grietas, sumideros plásticos o consolidados, ondulaciones, sartenes, exudaciones, desgaste, parches y huellas de ruedas. También se realizaron registros fotográficos de todo tipo de defectos encontrados en la sección en estudio.

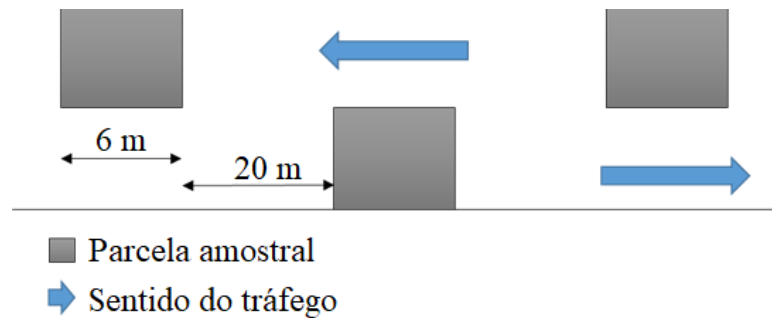


Figura 2. Esquema de distribución de las parcelas muestrales establecidas en el área de estudio.

### 2.3 Estudio de las patologías con Drone (alternativa)

Para adquirir las imágenes del área de estudio se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado - UAV, del fabricante DJI modelo Phantom 4 PRO (Figura 3). El referido UAV es un tipo multirrotor que pesa aproximadamente 1,5 kg y está equipado con una cámara de 20 megapíxeles (capaz de filmar a 4 k / 60 fps), con un alcance de transmisión de video de 7 km. La elección del equipo se basó en su facilidad de uso, estabilidad de vuelo, calidad de las imágenes generadas y precio asequible.



Figura 3. VANT DJI modelo Phantom 4 PRO utilizado en el estudio

Para las etapas de planificación del vuelo y posterior composición de la ortografía se utilizó la aplicación Drone Deploy. Permite parametrizar el plan de vuelo de acuerdo con la resolución deseada para las imágenes originales, la tasa de superposición de imágenes, las líneas de vuelo y la resolución resultante. Los parámetros de vuelo utilizados en el presente estudio se pueden ver en la Tabla 1. La ortografía fue generada automáticamente por la aplicación y exportada para su posterior análisis (Figura 4).

Tabla 1. Parámetros de vuelo utilizados en la encuesta

PARÁMETRO	VALOR
Altitud	70 m
Resolución	2,4 cm/píxel
Tasa de cobertura horizontal	65%
Tasa de cobertura vertical	75%
Velocidad de vuelo	15 m/s
Tiempo de vuelo	6 minutos
Número de fotos	109



Figura 4. Ortoimagen del área de estudio generada por la aplicación Drone Deploy.

#### 2.4 Cálculo del índice de gravedad global - IGG

Luego de mapear las patologías, se calculó el Índice de Severidad Global (IGG) para el área de estudio, siguiendo las recomendaciones del DNIT 006/2003 - PRO. Inicialmente se estimó la frecuencia absoluta ( $f_a$ ) de ocurrencia de cada tipo de manifestación patológica, correspondiente al número de veces que se verificó la ocurrencia. Luego, se obtuvo la frecuencia relativa ( $f_r$ ) para cada patología, a través de la Ecuación 1. Para cada tipo de patología se calculó el Índice de Severidad Individual - IGI (Ecuación 2), que luego se sumaron, dando como resultado el IGG (Ecuación 3).

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

Siendo,  
 $f_a$  - frecuencia absoluta

n - número de inspecciones realizadas (número de parcelas de muestra).

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

Siendo,

fr - frecuencia relativa

fp - factor de ponderación (según la tabla DNIT)

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

Se compararon los resultados obtenidos por las metodologías de referencia y alternativas según el número y tipo de patologías identificadas, así como el tiempo dedicado a la realización de las encuestas. Finalmente, los IGG obtenidos se compararon con la Norma DNIT 006/2003 - PRO, con el fin de determinar el concepto de degradación del tramo analizado (Cuadro 2).

Tabla 2. Concepto de degradación del pavimento por IGG.

Conceptos	Limites
Excelente	$0 < IGG \leq 20$
Bueno	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Malo	$80 < IGG \leq 160$
Terrible	$IGG > 160$

Fuente: NORMA DNIT 006/2003 – PRO

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis comparativo: inspección con drones frente a inspección tradicional

El apartado analizado presentó un gran número de patologías en ambos métodos empleados. La cuantificación total de patologías, sumando las 20 parcelas evaluadas, arrojó valores muy cercanos para ambos métodos, siendo 54 para la inspección tradicional y 53 para la inspección con el Drone, lo que demuestra la viabilidad de utilizar el Drone para cuantificar patologías sobre pavimentos (Figura 5).



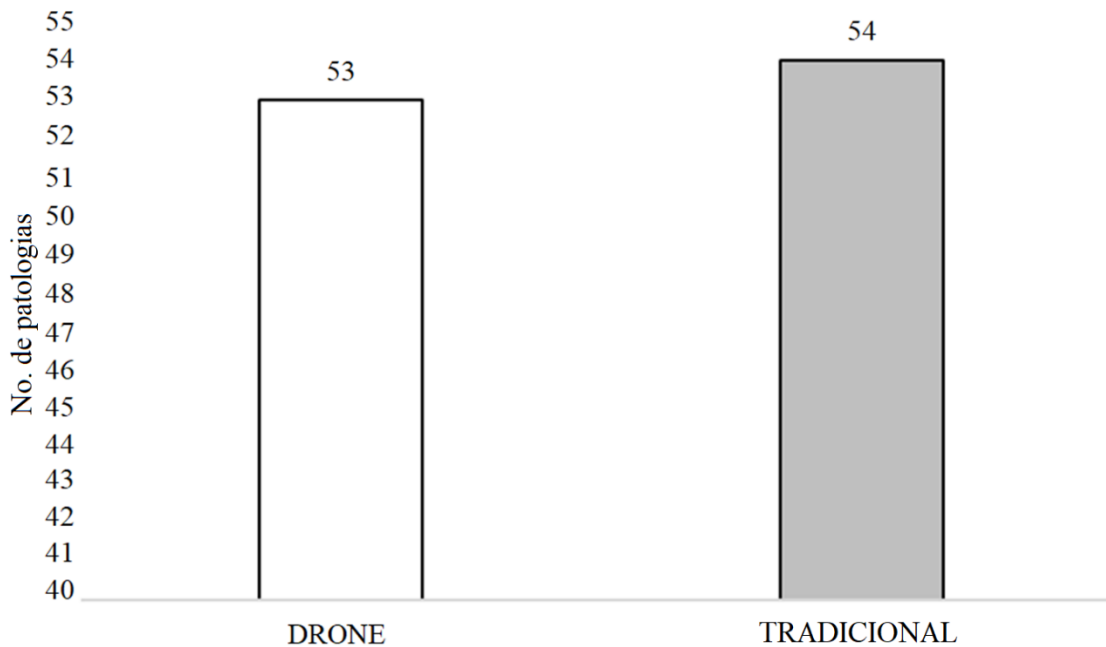


Figura 5. Patologías totales identificadas según el método de inspección.

En cuanto al aspecto cualitativo, la inspección realizada con el Drone permitió identificar 04 tipos de patologías, que son: macetas (P) - hueco o agujero que se forma en el revestimiento y puede llegar a la base; grietas (F): caracterizadas como aberturas en la superficie del asfalto que son visibles a simple vista; parches (R) - defecto caracterizado por el llenado de macetas o cualquier otro orificio, agujero o depresión con mezcla asfáltica; y deslizamiento (E) - desplazamiento en relación con la capa de pavimento. En cuanto a los tipos de patologías, no hubo diferencia entre el método de inspección tradicional y el método de inspección Drone. En cuanto al número de defectos por tipo de patología, hubo pequeñas diferencias entre los métodos utilizados, como se muestra en la figura 6.

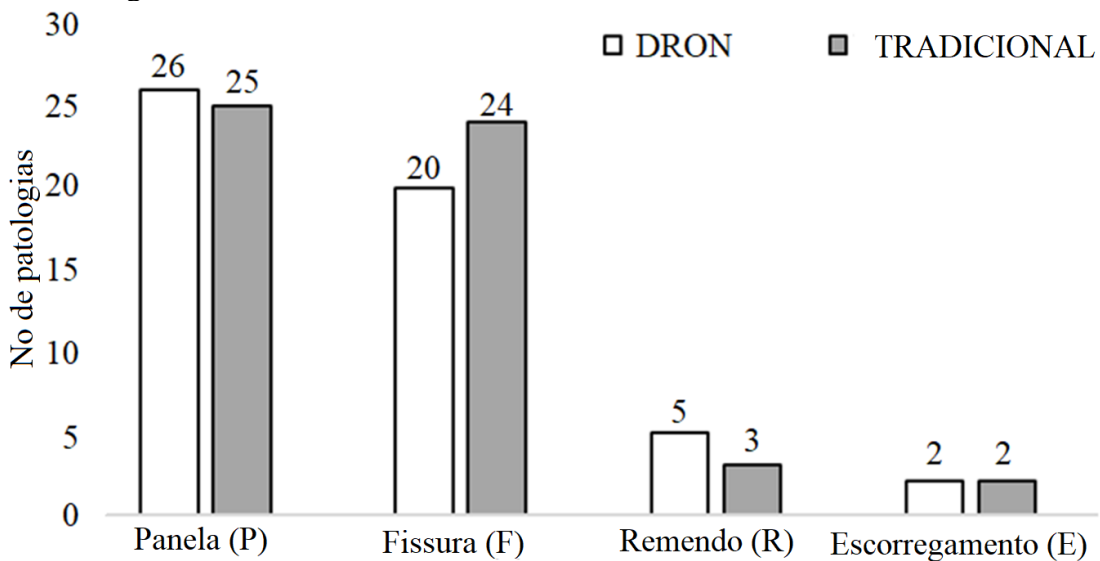


Figura 6. Patologías totales identificadas según el tipo y método de inspección.

Cabe señalar que la causa más probable de estas diferencias se debe a que algunos tipos de patologías pueden ser difíciles de identificar debido al uso de imágenes obtenidas por los UAV debido a su calidad, mientras que la inspección tradicional puede resolver cualquier duda sobre la aparición de una patología porque se trata de un análisis in situ. Como ejemplo, se pueden comparar

macetas y grietas. En el primer caso, es más fácil de identificar por la propia naturaleza de la patología, que en general destaca sobre el resto del pavimento. En el segundo, es mucho más difícil de identificar, a veces necesita confirmación a través de una inspección in situ. En la Figura 7 es posible comparar las imágenes obtenidas con el Drone y utilizando el método tradicional, para cada uno de los tipos de patologías identificadas.

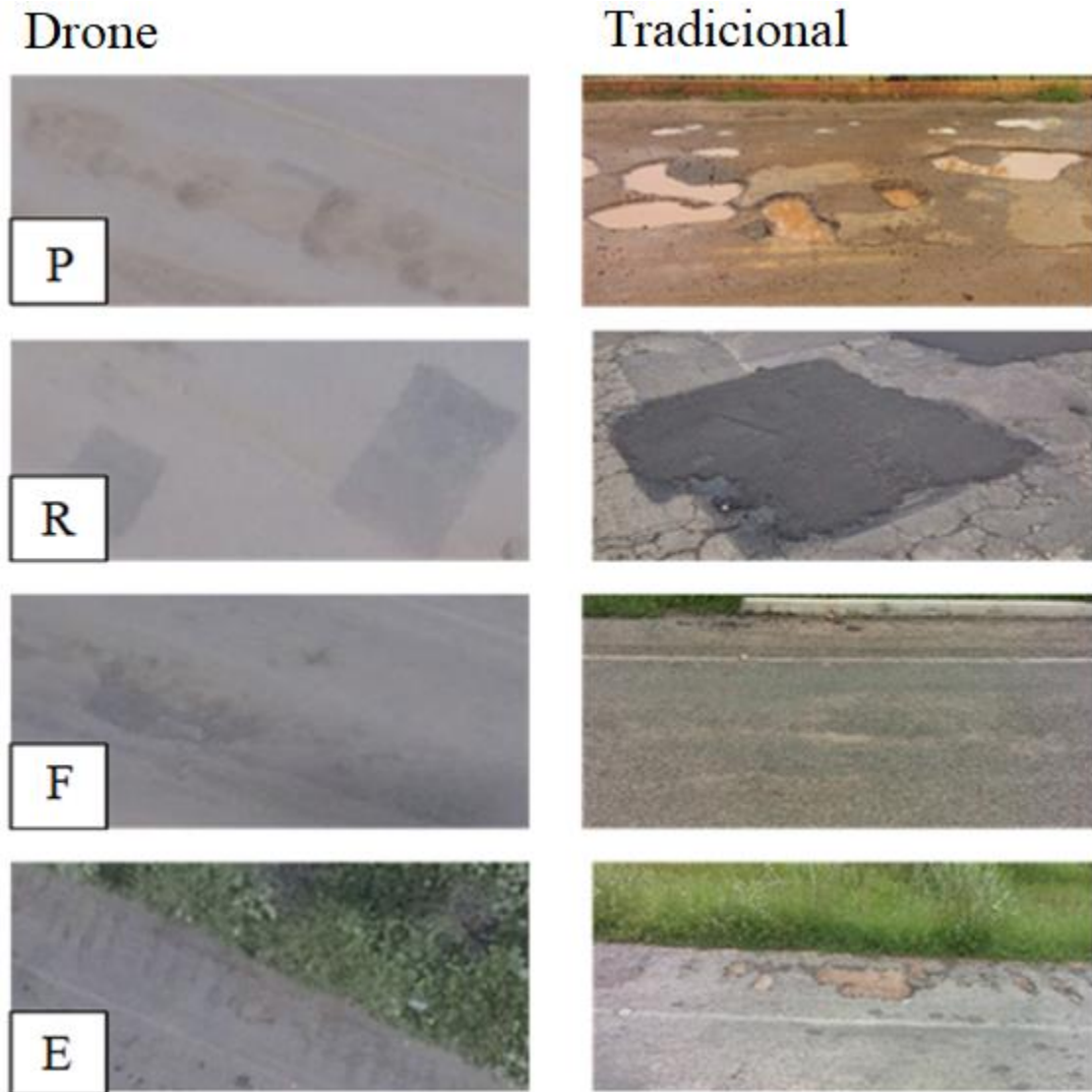


Figura 7. Patologías totales identificadas según el tipo y método de inspección.

Con respecto al tiempo dedicado a la inspección, se encontró que el análisis realizado con el Drone (6 minutos de vuelo y 12 minutos para evaluación de imagen) tomó menos de 1/3 del tiempo dedicado a realizar la inspección tradicional (Figura 8). Considerando que en el presente estudio se evaluó un pequeño tramo de 0,5 km, se asume que en tramos más largos de grandes carreteras esta diferencia es aún mayor, haciendo cada vez más atractivo el uso del Drone.

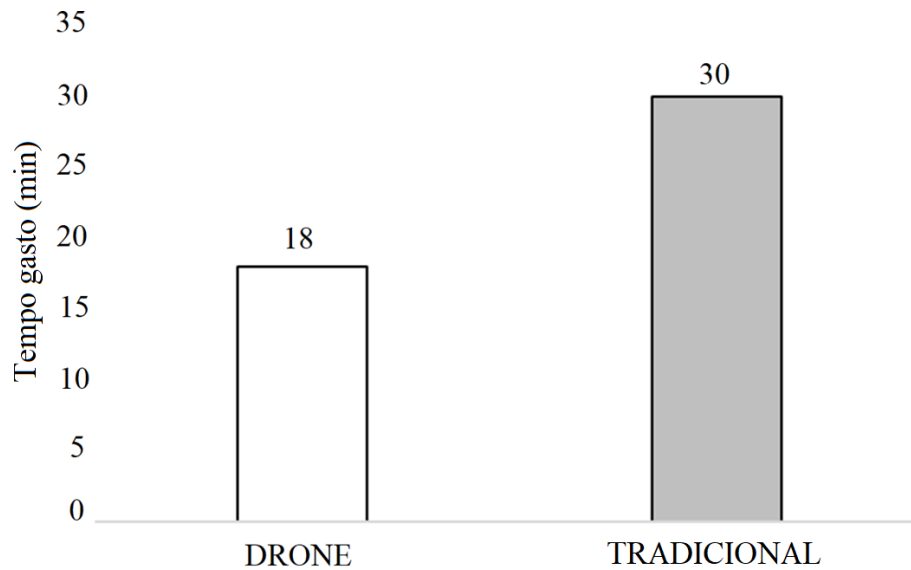


Figura 8. Tiempo empleado en realizar la inspección según la metodología utilizada.

### 3.2 Análisis comparativo: Drone x Inspección tradicional

El valor obtenido para el Índice de Severidad Global - IGG, fue 302 para la inspección realizada con el Drone y 320 para el método tradicional (Figura 9), y en ambos casos, según DNIT 006/2003 - PRO, el tramo evaluado se consideró terrible ( $IGG > 160$ ). Uno de los puntos que más influye en este resultado es la presencia de una gran cantidad de Pans (P), que se encontró en todas las parcelas estudiadas, que es la patología que más impacta el tráfico y contribuye a la aceleración por degradación del pavimento. Aunque se han obtenido diferentes valores, se observa que la diferencia existente no es significativa, demostrando que la inspección con la ayuda de Drones es técnicamente factible.

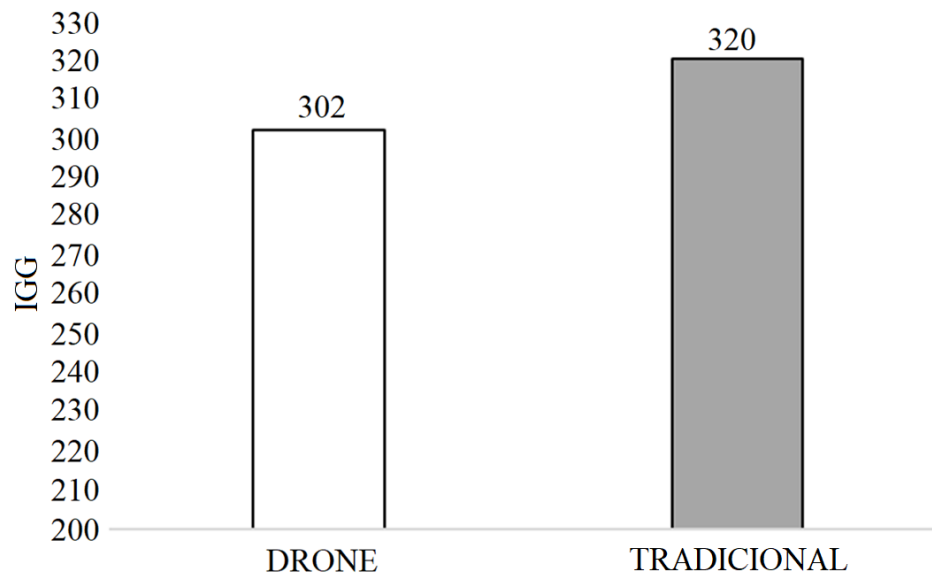


Figura 9. Índice de Severidad Global - IGG según la metodología utilizada.

### 3.3 Análisis general de la metodología propuesta

La metodología de uso de UAV para inspección de pavimentos ya se puede observar en trabajos como Parente, Felix y Picanço (2017), donde, como en el presente trabajo, se utilizó esta herramienta en comparación con la metodología estándar actual. La adición de una evaluación comparativa entre el método propuesto y el método tradicional es esencial para la cuantificación estadística de la efectividad de cualquier metodología alternativa propuesta. Por tanto, otro resultado señalado por este trabajo es una metodología de comparación para el uso de UAV en inspecciones de estructuras de cualquier tipo, en comparación con los métodos tradicionales.

## 4. CONCLUSIÓN

El uso de Drones se ha vuelto cada vez más común en varias áreas de la ingeniería, estimulado principalmente por la popularización de esta tecnología y las diversas posibilidades que ofrece. Sin embargo, su uso debe ser evaluado previamente y las metodologías tradicionales deben ser adecuadas para que los resultados que brinde este equipo sean confiables. El presente estudio demostró el uso de Drones para inspeccionar patologías en pavimentos asfálticos, en base a la Norma DNIT 006/2003 - PRO, obteniendo aproximadamente un 94,4% de acierto, teniendo en cuenta los resultados con la metodología tradicional, con reducción significativa del tiempo de funcionamiento con menos de 1/3 del tiempo empleado. Cabe destacar también que la presente otorga subvenciones para la mejora del proceso de evaluación vial, permitiendo lograr la mejor aplicación posible de los recursos públicos disponibles y ofreciendo un transporte por carretera seguro, compatible y económico. El método propuesto se puede refinar aún más mediante el uso de Drones con sensores multispectrales, generando otros resultados que, a través de imágenes infrarrojas o tridimensionales, pueden agregar valor e información diferente al servicio relacionado con las inspecciones de pavimentos, aumentando también la efectividad de la metodología 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](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>

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

C. Aire<sup>1</sup>\*, L. Aguilar<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [aire@pumas.iingen.unam.mx](mailto:aire@pumas.iingen.unam.mx)

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

Recepción: 18/06/2020 | Aceptación: 31/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Aire, C., Aguilar, L. (2021), "*Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 73 – 87, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.493>

<sup>1</sup> Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo el primer autor contribuyó con la campaña experimental (50%), el análisis de los resultados y la redacción del artículo, el segundo autor con la campaña experimental (50%) y revisión del artículo.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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

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

### 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

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de fibras en el concreto se ha convertido en una tendencia frecuente en la industria de la construcción. En nuestro país, inicialmente reemplazaron mallas electrosoldadas en concretos lanzados, pisos industriales y elementos prefabricados. A nivel internacional, son variadas las aplicaciones de esta tecnología, entre ellas, pavimentos, pisos industriales, sostenimiento de taludes, elementos arquitectónicos y en construcción de túneles (Gettu et.al., 2004; Kasper et.al., 2008; De la Fuente et.al., 2012). En la actualidad también se emplean las fibras de acero en la construcción de dovelas para el revestimiento de túneles (Blom, 2002), (Burgers et.al., 2007), (De la Fuente et.al., 2013). En México, las primeras aplicaciones fueron en pisos industriales, sin embargo, recientemente se ha incrementado su uso, principalmente en obras subterráneas, tanto en obras civiles como en minería.

Una de las principales propiedades beneficiadas por el reforzamiento con fibras en el concreto es la capacidad de absorción de energía después de la fisuración, esto quiere decir que, por más que el elemento se fisure, éste podrá seguir resistiendo carga y deformarse sin colapsar, permitiendo la redistribución de tensiones (De Waal, 2000), mejorando el comportamiento ante la fractura, el impacto y la fatiga (Gopalaratnam y Gettu, 1995). La eficiencia de las fibras incorporadas a la mezcla de concreto depende de (1) las propiedades de la fibra: resistencia, rigidez y unión, (2) la distribución de la fibra: fracción relativa, contenido y orientación (Zollo, 1997).

Para medir la absorción de energía se han desarrollado diferentes métodos de prueba estandarizados que permiten evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras, para su aplicación es importante tener en cuenta: 1) La complejidad de la prueba; 2) La complejidad de la preparación de las muestras; 3) La complejidad de la ejecución; 4) La reproductividad de la prueba; 5) El costo y la aplicabilidad en la práctica y la aceptación del método de prueba por los investigadores. (Kooiman, 2000). Los métodos propuestos para evaluar la absorción de energía de los CRF, deben ser evaluados conforme a las condiciones descritas anteriormente para determinar su aplicación práctica como Protocolos de Control en Obra para los CRF.

Teniendo en cuenta los fundamentos anteriores y la amplia experiencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM en investigaciones sobre CRF, en este trabajo se presentan los resultados de un Programa Experimental para evaluar el desempeño del CLRF en un caso práctico, la Ampliación de la Línea 12 del Metro de la CDMX. Se evalúa la Absorción de Energía (Tenacidad) del concreto del revestimiento primario del túnel de la L-12 y su complejidad para elaborar los especímenes correspondientes a los ensayos de panel de sección cuadrada EN 14488-5 ( $l\ 600 \times l\ 600 \times h\ 100$  mm), ensayo de panel circular ASTM C1550 ( $\phi\ 800 \times e\ 75$  mm) y ensayo Barcelona UNE 83515 ( $h\ 150 \times \phi\ 150$  mm) propuesto por Chen (1970). Se decide utilizar normatividad internacional debido a que, durante esta campaña experimental, en México no se cuenta con normas que permitan evaluar este tipo de ensayos.

## 2. OBRA DE AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CDMX

### 2.1 Generalidades

La Secretaría de Obras y Servicios de la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGOT) construye la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Es un proyecto de infraestructura que consiste en un túnel de 4.6 kilómetros de longitud en los que se ubicarán tres estaciones de metro que conectarán las estaciones Mixcoac y Observatorio, uniendo las zonas Oriente y Poniente de la ciudad de México. Con esta ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México, se prevé que el tiempo de traslado entre las Estaciones Mixcoac a Observatorio se reduzca en hasta 60 por ciento.

El proyecto ejecutivo, que actualmente se encuentra en su primera fase consiste en la construcción



de 13 lumbreras de una profundidad entre 15 y 46.5 m. Las lumbreras sirven para comunicar al túnel con el exterior y al mismo tiempo introducir la maquinaria, equipo, personal de la obra y materiales necesarios para la construcción. El perfil estratigráfico del suelo a lo largo del trazo del proyecto es predominante de arcilla arenosa de consistencia dura, sin embargo, en algunos tramos de túnel se encuentran suelos blandos de poca estabilidad. No existe presencia de nivel de aguas freáticas. En el caso de suelos inestables se resuelve con elementos de soporte, tales como marcos metálicos con separación de 0.50 m a 1.00 m entre ellos, dependiendo del tipo de suelo blando. En otros casos, cuando se presenta sobreexcavación se resuelve con productos de inyección, como lechadas de cemento y concreto fluido, cuya selección se adopta de acuerdo con la magnitud de la sobreexcavación.

Para la construcción del túnel de 4.6 km de longitud y diámetro promedio de 11 m, se emplea el método de excavación mecánica convencional mediante máquinas rozadoras. Las rozadoras excavan mediante una cabeza giratoria, provista de dientes de corte que van montadas sobre un brazo mecánico que permite la excavación. El avance promedio de excavación es de 1.5 m. haciendo un promedio de dos a tres avances por día. Posterior a la excavación de la sección media superior, se coloca el revestimiento primario para dar estabilidad al terreno, que consiste en aplicar concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) de acero. El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, que se coloca en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente. Entre la capa de revestimiento primario y secundario se coloca una geomembrana de PVC para evitar posibles filtraciones de agua hacia el revestimiento definitivo. El revestimiento secundario es de concreto de 40 cm de espesor en bóveda. En esta segunda capa de revestimiento, se emplea concreto lanzado sin fibras; el refuerzo es con varillas de acero.

## 2.2 Ensayos de control

La propiedad más representativa del CLRF es la absorción de energía. Después de que el concreto se agrieta, las fibras empiezan a trabajar durante el proceso de agrietamiento, redistribuyendo y controlando la propagación de las grietas a medida que el sistema de revestimiento de CLRF experimenta deformación. La capacidad de carga del CLRF determina el desempeño del sistema de revestimiento.

La absorción de energía del CLRF se determina mediante la realización de ensayos de flexión. Existen dos procedimientos de uso tradicional: a) el ensayo de panel, de sección circular o sección cuadrada, y b) el ensayo de viga. Para su determinación se han desarrollado nuevos métodos de prueba estandarizados, los cuales se usan internacionalmente. El ensayo de viga se usa principalmente en aplicaciones de pavimentos.

El desempeño post-elástico de paneles circulares/cuadrados sujetos a una carga puntual en el centro, es representado por la energía absorbida hasta una deflexión central especificada. Los métodos típicos de prueba de resistencia a flexión incluyen el ASTM C1550, de paneles circulares, y la EN 14488-5, de paneles cuadrados. La determinación de la capacidad de absorción de energía es el factor más importante para evaluar el rendimiento del CLRF, la cual se calcula para una deflexión especificada, 25 mm en panel cuadrado y 40 mm en panel circular.

Otros métodos para evaluar la resistencia a flexión son las pruebas en vigas. Para ello se requiere paneles de CLRF que se cortan en vigas y son ensayadas de acuerdo con los estándares ASTM C1609 y UNE EN-14651, para determinar la tenacidad en flexión.

Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (Double-Punching Test, DPT), propuesto por Chen (1970) normalizado por UNE 83515, conocido como ensayo Barcelona. Con este ensayo se determina la tenacidad en cilindros que se calcula para una apertura circunferencial de fisura especificada de 6 mm. Carmona et.al., (2009), considera que este ensayo se caracteriza por su baja complejidad en la elaboración de probetas, aporta un adecuado control sistemático del CRF en obra y presenta una gran superficie específica de fractura a lo largo de su altura.

Para evaluar el desempeño de los concretos del revestimiento primario del túnel de la L-12 el II-UNAM realizó ensayos de control, para lo cual se fabricaron diferentes tipos de muestras de CLRF obtenidas en el túnel, y emprendió una campaña experimental dando seguimiento a todas las operaciones de colocación del concreto, con énfasis en el muestreo y ensayo de especímenes.

La figura 1 muestra un procedimiento típico de la colocación del revestimiento primario de CLRF de acero en el túnel L-12. Al llegar a obra el camión de concreto se procede a obtener una muestra de concreto sin fibra, se mide la temperatura y revenimiento para su rechazo o aceptación. En caso de aceptación, enseguida se incorpora la cantidad de fibra de diseño, permitiendo que se integre y mezcle durante el tiempo establecido. Una vez terminado el tiempo de mezclado, el concreto se suministra al interior del túnel mediante una tubería, la cual es recibida por un camión revolvedor que transporta el concreto desde la lumbrera hacia el frente de trabajo incorporándolo al equipo de lanzado. Los materiales empleados en la fabricación del concreto fueron: cemento CPC 40RS (NMX-C-414-ONNCCE), agregados pétreos: arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo (NMX-C-111-ONNCCE), aditivo de línea tipo B y F (ASTM C 494), aditivo acelerante TamShot 70 AF (ASTM C 1141) y fibra de acero de 35 mm de longitud, relación de esbeltez ( $l/\varnothing$ ) 65, resistencia a la tracción de 1.345 (N/mm<sup>2</sup>), en una dosis de 30 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Una relación de agua/cemento 0.50. La resistencia a compresión de diseño especificada a 28 días es de  $f'c = 250$  kg/cm<sup>2</sup>,

Se realizaron tres tipos de muestreo, panel circular, panel cuadrado y artesas, a partir de los cuales se realizaron los ensayos ASTM C1550 (panel circular), EN 14488-5 (panel cuadrado) y UNE 83515 (ensayo Barcelona). Todas las probetas que se obtuvieron para esta campaña experimental corresponden al mismo diseño de mezcla, y cada tipo de muestreo al mismo lote suministrado en campo. Sin embargo, no se cuenta con el diseño de la mezcla porque esta información es propiedad del proveedor del concreto.



Figura 1. Procedimiento de colocación del revestimiento primario del túnel L-12

### 3. ENSAYO DE PANEL CUADRADO – EN 14488-5

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección cuadrada de  $l\ 600 \times l\ 600$  mm de sección y  $h\ 100$  mm de espesor se realizaron de acuerdo con la norma EN 14488-5. La prueba consiste en ensayar paneles cuadrados, que se someten a una carga central que se aplica a través de una placa cuadrada de  $100 \times 100$  mm y 20 mm de espesor. Del ensayo se obtiene el comportamiento carga-desplazamiento y a partir de esta curva se calcula la capacidad de absorción de energía en el rango de post-agrietamiento hasta un desplazamiento especificado de 25 mm, calculada como el área bajo la curva.

Para realizar el ensayo de panel cuadrado se dispone de un sistema de control por lazo cerrado que permite el control por desplazamiento, y un marco de carga que se integra a un sistema de actuador y celda de carga. El actuador tiene una capacidad de 500 kN, y para la instrumentación de los paneles se emplea un transductor de desplazamiento tipo LVDT. La velocidad de aplicación del

desplazamiento del pistón del actuador fue de 1 mm/min. El rango de medición del LVDT empleado es de 100 mm.

En la figura 2, se muestra la configuración del ensayo de panel cuadrado, de acuerdo con la EN 14488-5. La cara del panel que se enrasa corresponde a la cara superior del espécimen en la prueba (EN 14488-5).

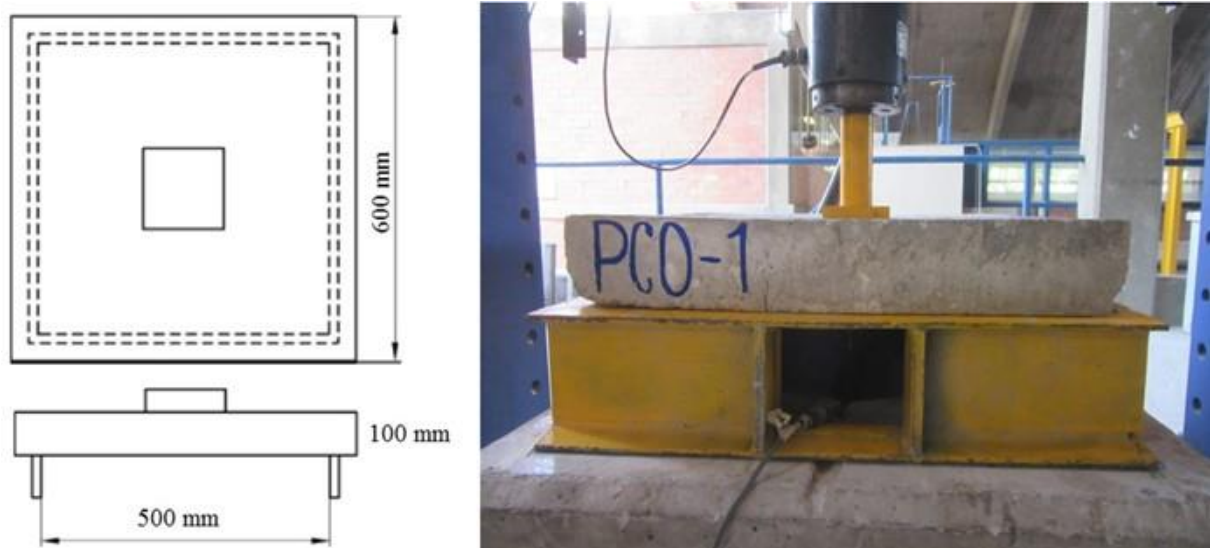


Figura 2. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la EN 14488-5

Los paneles utilizados para este ensayo corresponden a los especímenes PCO-1, PCO-2 y PCO-3, mismos que se obtuvieron a partir de la misma mezcla (lote) de concreto suministrada en campo para el revestimiento primario del túnel. Su falla típica se comporta formando dos fisuras principales que atraviesan toda la sección del panel, y otras fisuras secundarias, como se muestra en la figura 3. La falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto.

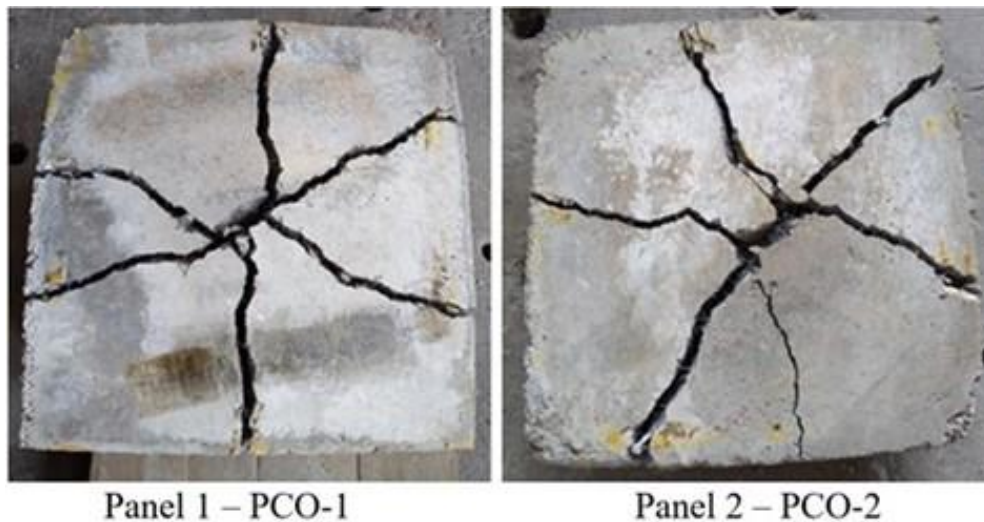


Figura 3. Modo de falla típico de los paneles cuadrados ensayados

La figura 4 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados. Las curvas muestran un comportamiento similar, independientemente del panel ensayado. Las curvas presentan dos tramos, un tramo inicial ascendente y el post-agrietamiento descendente. En el primer tramo la

carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento, y se presentan varios picos. En este tramo inicial de la curva el aporte de la fibra no es total, hasta que se presenta el agrietamiento a partir del cual la fibra trabaja en conjunto con el concreto. En esta fase, se observaron varios descensos de carga que se deben principalmente al agrietamiento del concreto. Sin embargo, hay una recuperación en todos los casos hasta alcanzar un valor de carga máxima, a partir del cual se presenta un descenso gradual en el post-agrietamiento. La prueba finaliza al alcanzar un desplazamiento mínimo de 25 mm. La figura 4 muestra que el comportamiento post-agrietamiento es muy similar para ambos paneles, asimismo, los valores de carga máxima son bastante parecidas; por lo que se estima que la absorción de energía presente valores semejantes.

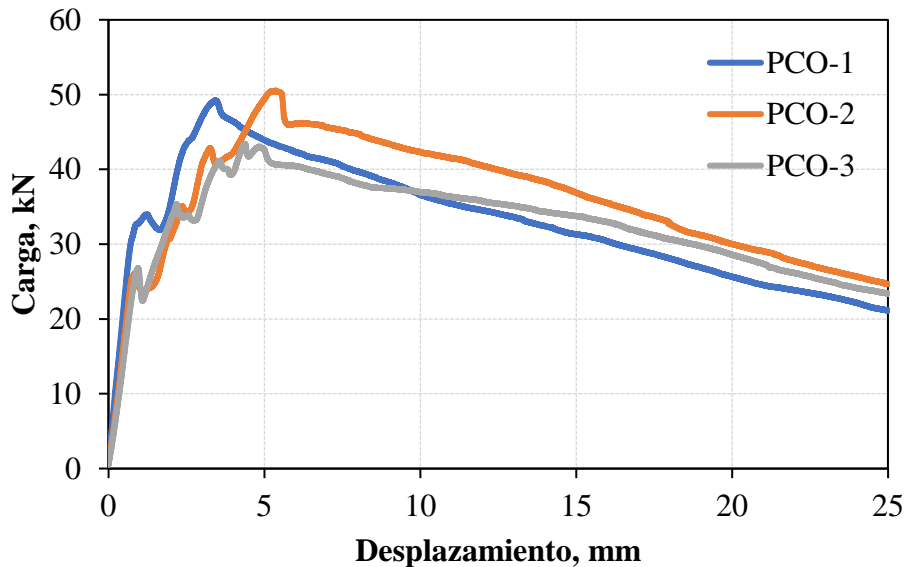


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento de los paneles cuadrados ensayados

La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central de 25 mm, como lo especifica la EN 14488-5. Los resultados se muestran en la tabla 1. Los resultados muestran que la tenacidad (absorción de energía) promedio de los paneles ensayados es de 843.14, con un coeficiente de variación de 5.27%. La repetitividad de los resultados es bastante aceptable.

Tabla 1. Resultados de tenacidad,  $T_{\delta 25\text{mm}}$

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

Estos paneles de prueba tienen un alto grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 80 kg cada uno, además de requerir, al menos, dos personas capacitadas para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. Se debe contemplar el excedente de concreto para su elaboración, alrededor de 0.1 m<sup>3</sup> por las tres probetas, situación que representa un costo extraordinario en el consumo de concreto, mismo que estará afectado por la periodicidad de la prueba, sin embargo, su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso en el Protocolo de Control como método de evaluación, o en su defecto, utilizar otra prueba en caso de conocer su correlación con ésta.

#### 4. ENSAYO DE PANEL CIRCULAR – ASTM C1550

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección circular de  $75 e \times 800 \phi$  mm, se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1550. La prueba permite caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento.

Para la realización de las pruebas se dispone de un dispositivo de montaje para los paneles que cumple con las especificaciones de la norma. El dispositivo está conformado por una placa circular sobre el cual se colocan tres puntos de apoyo diametralmente equidistantes. Estos tres puntos de apoyo se colocan simétricamente circunscritos en un círculo de 750 mm de diámetro, y deben resistir la aplicación de una carga vertical de 100 kN en el centro del panel y ser lo suficientemente rígido para que no se presenten desplazamientos inadmisibles durante la prueba. Estos apoyos están conformados por unas bases piramidales de acero con dispositivos en los vértices que hacen de rotula y permiten el libre giro de la placa durante la prueba.

El panel se apoya en los tres pivotes dispuestos simétricamente y se aplica una carga puntual sobre el centro del panel, como se muestra en la figura 5. La carga se aplica en la cara enrasada, estando la cara moldeada del panel apoyada sobre los tres pivotes. Durante la prueba se registra la carga y desplazamiento de manera continua y se obtiene la curva carga-desplazamiento a partir del cual se puede obtener la absorción de energía.

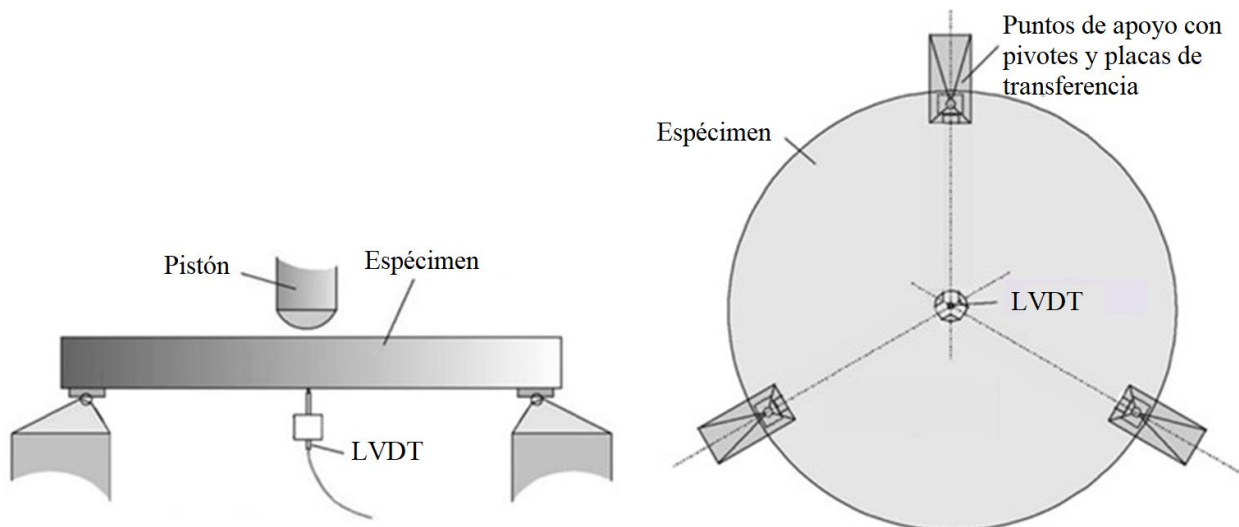


Figura 5. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la ASTM C1550

La información de la respuesta completa carga-desplazamiento del ensayo de panel circular, también requiere de un equipo de prueba muy rígido y un sistema de control que permita obtener información del post-pico (post-agrietamiento), por lo cual, se empleó el mismo equipo ensayo del panel cuadrado. La velocidad de desplazamiento aplicada fue de 4 mm/min, como lo establece la ASTM C1550. La prueba finaliza cuando se alcanza, como mínimo, un desplazamiento de 40 mm. La instrumentación se hizo mediante un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango, que se coloca al centro de la parte inferior del panel. La absorción de energía, calculada como el área bajo la curva carga-desplazamiento se determina para 5, 10, 20 y 40 mm de desplazamiento, como lo especifica la norma.

Los paneles ensayados con carga central puntual fallaron típicamente formando tres fisuras radiales que empiezan en el centro del panel y dividen el espécimen en tres secciones, como se muestra en la figura 6. El modo de falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto, a diferencia del ensayo de paneles sin fibra, en donde de experiencias previas se ha observado que la falla es repentina (Aire y Rodríguez, 2011).

De acuerdo con la ASTM C1550, un ensayo exitoso implica un modo de falla que incluya al menos tres grietas radiales. Ocasionalmente, los especímenes presentan un modo de falla que implica una sola fisura, los cuales se caracterizan por presentar una baja absorción de energía. El resultado de esta prueba deber ser descartada y solo se deben considerar el resultado de dos ensayos que presenten modo de falla que incluya tres grietas radiales. En este estudio los tres paneles presentaron tres fisuras radiales.

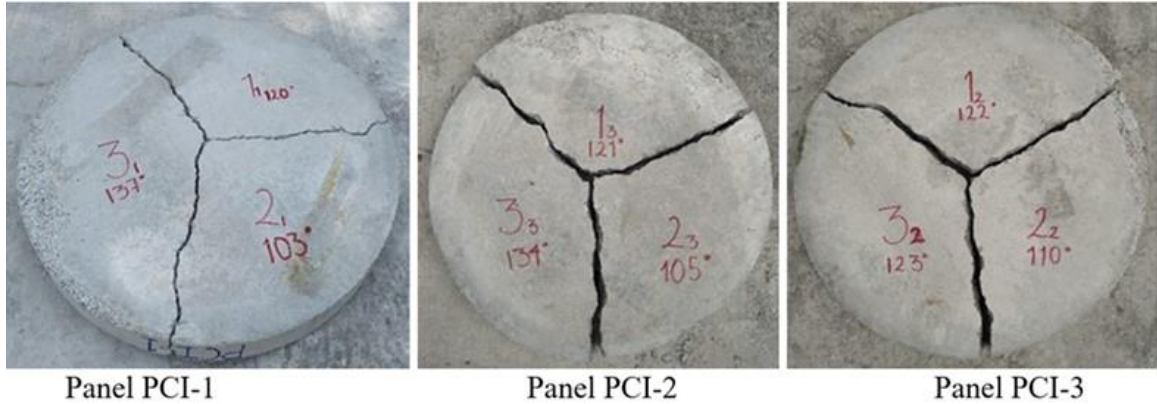


Figura 6. Modo de falla de paneles circulares

La figura 7 muestra la configuración del ensayo de panel circular y en la figura 8 se presentan las curvas carga-desplazamiento a partir de los resultados obtenidos. En México, el método de ensayo equivalente del ASTM C 1550 esta normado en la NMX C539 (NMX 539, 2017). Las curvas carga-desplazamiento presentan un tramo inicial ascendente donde la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento. En este tramo inicial lineal la carga es soportada por el concreto y el aporte de la fibra es mínimo o nulo. En esta primera fase, la curva alcanza un pico máximo (carga máxima), y enseguida se inicia el proceso de agrietamiento del concreto y la carga se transmite a las fibras, hasta que finalmente absorben toda la carga y las fibras trabajan en conjunto con el concreto. La fase de post-agrietamiento se caracteriza por el descenso gradual de la carga y desplazamiento. Los tres paneles presentan capacidades residuales similares.



Figura 7. Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550

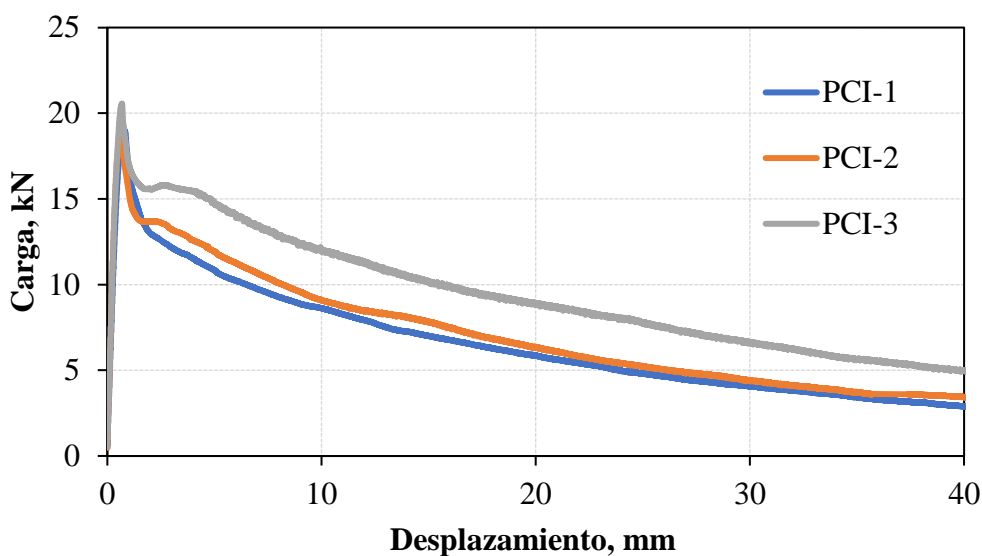


Figura 8. Curva carga vs desplazamiento de paneles circulares

La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la norma. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la ASTM C1550. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía promedio para los paneles ensayados es de 311 Joules para un desplazamiento de 40 mm, con un coeficiente de variación de 19.7%.

Tabla 2. Resultados de tenacidad,  $T_{\delta 5mm}$ ,  $T_{\delta 10mm}$ ,  $T_{\delta 20mm}$  y  $T_{\delta 40mm}$

ID	U	T $\delta 5$ mm	T $\delta 10$ mm	T $\delta 20$ mm	T $\delta 40$ 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

Los paneles circulares, de igual forma que los paneles cuadrados también tienen un alto grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 100 kg cada uno, además de requerir, al menos, dos personas capacitadas para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. El proceso de enrase es tedioso y dependiendo de las características de la obra, su traslado hasta los cuartos de curado requiere de equipo mayor, además se debe contar con suficiente espacio para ser almacenados y curados. Se debe contemplar el excedente de concreto para su elaboración, alrededor de 0.15 m<sup>3</sup> por las tres probetas, situación que representa un costo extraordinario en el consumo de concreto, mismo que estará afectado por la periodicidad de la prueba, sin embargo, su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso para el Protocolo de Control como método de evaluación, o en su defecto, utilizar otra prueba en caso de conocer su correlación con ésta.

## 5. ENSAYO BARCELONA – UNE 83515

El ensayo Barcelona es un método de prueba para determinar la resistencia a fisuración, la tenacidad y la resistencia residual del concreto reforzado con fibras mediante un ensayo de doble punzonamiento. Es aplicable a probetas cilíndricas de concreto, moldeadas o extraídas de una estructura, de altura aproximadamente igual a su diámetro. Los elementos indispensables para la aplicación de este método de prueba son: la cadena circunferencial con extensómetro, discos de carga (punzones) y discos de montaje. Las probetas de ensayo pueden obtenerse de moldeo directo de moldes cilíndricos de  $h 150 \times \phi 150$  mm, de moldes cilíndricos de  $h 150 \times \phi 300$  mm y corte posterior para obtener  $h/\phi = 1$ , o de extracción de testigos de  $\phi 150$  mm de estructuras reales, que es una ventaja del método cuando se requiere evaluar el desempeño del concreto colocado en obra. La prueba se realiza de acuerdo con la norma UNE 83515. La figura 9 muestra un esquema de la configuración del ensayo Barcelona. La carga se debe aplicar de forma uniforme con una velocidad de descenso del pistón de la prensa de  $0.5 \pm 0.05$  mm/min durante todo el ensayo. Éste se considera finalizado cuando el desplazamiento circunferencial total alcance como mínimo los 6 mm.

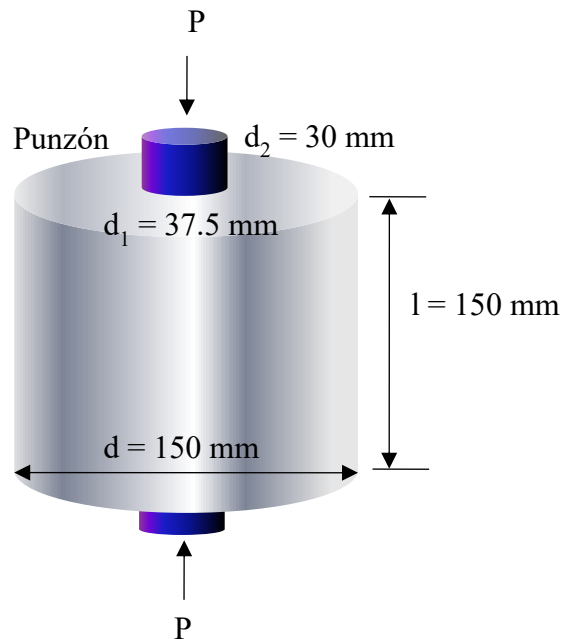


Figura 9 Configuración del ensayo Barcelona – UNE 83515

Para la realización de este ensayo se llevó a cabo el muestreo de artesa de madera de  $650 B \times 350 b \times 150 h$  mm, de donde fueron extraídos 4 testigos. Para la extracción de testigos se usó una extractora de corazones, como la que se muestra en la figura 10. Se aseguró la verticalidad de los testigos nivelando la superficie de apoyo. La carga se aplicó sobre la cara enrasada.

La figura 11 muestra la configuración del ensayo. En método de ensayo equivalente de la UNE 83515 en México es la NMX C538 (NMX C538, 2017).





Figura 10. Extracción de testigos para Ensayo Barcelona.



Figura 11. Ensayo de doble punzonamiento, configuración, UNE 83515

La falla del cilindro del ensayo Barcelona presenta 3 grietas que atraviesan toda la altura del cilindro., como se aprecia en la figura 12.



Figura 12. Modo de falla típico de los cilindros, Ensayo Barcelona.

En la figura 13 se presentan las curvas carga-desplazamiento circunferencial de los cilindros ensayados. Las curvas presentan un desplazamiento casi nulo desde el inicio de carga hasta alcanzar la carga máxima. Al llegar a la carga máxima se presentan las primeras fisuras y el post-agrietamiento. La carga disminuye hasta una abertura circunferencial determinada y empiezan a trabajar las fibras. La carga se recupera y se presenta el comportamiento residual.

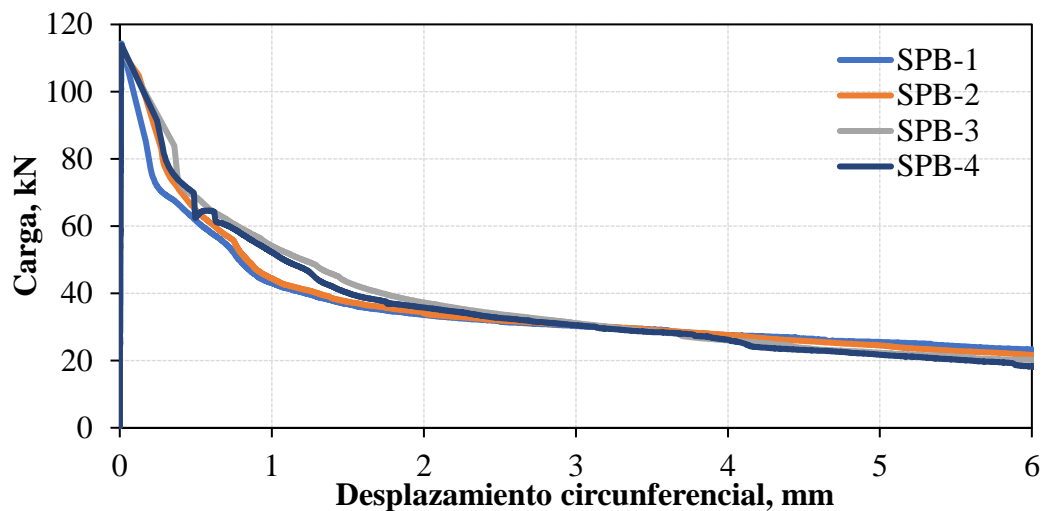


Figura 13. Curvas carga-apertura circunferencial del ensayo Barcelona

La tabla 3 muestra los resultados de tenacidad de los cilindros ensayados. El coeficiente de variación de los resultados varía entre 2.5% y 6.8%.

 Tabla 3. Resultados de tenacidad,  $T_{\delta 2\text{mm}}$ ,  $T_{2.5\text{mm}}$ ,  $T_{\delta 4\text{mm}}$  y  $T_{\delta 6\text{mm}}$ 

ID	U	SPB-1	SPB -2	SPB -3	SPB -4	Prom	CV %
$T_{ct\ 2\ \text{mm}}$	Joules	102.9	108.9	120.2	115.5	111.9	6.8
$T_{ct2.5\text{mm}}$	Joules	119.2	125.5	137.9	132.5	128.8	6.3
$T_{ct\ 4\ \text{mm}}$	Joules	163.8	170.2	182.8	177.2	173.5	4.8
$T_{ct\ 6\ \text{mm}}$	Joules	214.7	219.1	227.9	220.5	220.5	2.5

Los cilindros utilizados para esta prueba tienen la ventaja de ser obtenidos a partir de artesas si se trata de Concretos Lanzados, extraerlos a partir de un elemento colado o elaborar propiamente los cilindros con moldes específicos, por lo tanto, su obtención tiene un bajo grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 5 kg cada uno, además de requerir una persona capacitada para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. El excedente de concreto para su elaboración es mínimo, y su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso para el Protocolo de Control como método de evaluación.

## 6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos para los tres ensayos propuestos en términos de absorción de energía, se encontró en el análisis estadístico mayor variabilidad en los resultados de los paneles circulares, y una menor variabilidad en los cilindros para el Ensayo Barcelona. Esta situación puede atribuirse a razón de mayor espesor, mayor concentración de fibras en el núcleo de concreto.

Los muestreos hasta ahora desarrollados en la obra de ampliación de la L12 representan un proyecto piloto a fin de valorar la aplicación de los métodos, mismos que no están especificados para el proyecto, por lo tanto, no se puede afirmar que los valores obtenidos cumplen con los parámetros especificados en términos de absorción de energía para los CLRF de acero, sin embargo, representa un parteaguas para la implementación de un Protocolo de Control que evalúe el desempeño del CLRF y permita conocer los diferentes escenarios, facilidades, dificultades y otros aspectos que se presentan en obra durante el desarrollo de los muestreos, resultado de ensayos y análisis de todos

los componentes involucrados.

Derivado de la campaña experimental aplicada al caso práctico de la Ampliación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, se identifica que los procesos de muestreo, preparación de especímenes y prueba para el Ensayo Barcelona (UNE 83515) resultan más prácticos desde el punto de vista de las condiciones de la obra, por tratarse de probetas de menor peso y menor dimensiones, comparada con los paneles, por consiguiente, se elaboran en menor tiempo y cuando se tiene la suficiente experiencia, la manipulación, preparación y ensayos, puede ser realizado por una sola persona.

El aumento en el uso de CRF, la experiencia ganada en estos trabajos de campo y de investigaciones afín, ha motivado al sector privado, empresas constructoras e instituciones académicas como es el Instituto de Ingeniería de la UNAM a plantear, proponer y desarrollar métodos de ensayo nacionales para evaluar el CRF basados en la normatividad internacional, con uso de información en aplicaciones locales. Los cuales impulsarán un nuevo sistema de control de calidad para el concreto reforzado con fibras en obras subterráneas en México.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte de la Ciudad de México por las facilidades brindadas durante los trabajos de muestreo de especímenes en el túnel, que permitió la realización de este trabajo.

## 8. REFERENCIAS

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](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](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](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 33<sup>rd</sup>

- 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.), 6<sup>th</sup> 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)

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

R. D. B. Ruiz<sup>1\*</sup> , A. C. Lordsleem Júnior<sup>1</sup> , J. H. A. Rocha<sup>2</sup> 

\*Autor de Contacto: [Ramiro.DBR@hotmail.com](mailto:Ramiro.DBR@hotmail.com)

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

Recepción: 07/10/2020 | Aceptación: 13/12/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Silva, Ruiz, R. D. B., Lordsleem Júnior, A. C., Rocha, J. H. A. (2021), "Inspección de fachadas con Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT): estudio exploratorio", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. x-x, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>

<sup>1</sup> Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

#### Contribución 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.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

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

### **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.

**Palabras clave:** VANT; inspeção predial; inspeção visual; monitoramento; fotos aéreas.

### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

La inspección visual de fachadas en las edificaciones es una actividad que tiene como objetivo evaluar el estado de conservación del cerramiento vertical y los diferentes elementos que la componen, ofreciendo directrices para un mantenimiento eficaz y de costo-beneficio adecuado. Con esa práctica se puede garantizar el buen funcionamiento del sistema de cerramiento vertical, permitiendo cumplir las funciones para las cuales fue construido y posiblemente ser extendida a su vida útil (Pires et al., 2015; Flores-Colen et al., 2008).

Para ese fin, la metodología eficaz que reduce tanto el tiempo como el costo de esa actividad es la inspección visual con uso del Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) (Melo y Costa, 2015). Con ayuda de esa tecnología es posible realizar la filmación completa y captura de fotografías en alta resolución HD (High Definition) de todos los principales puntos investigados. La investigación detallada puede registrar problemas no observados a simple vista de la planta baja, como por ejemplo: filtraciones, desprendimiento o perforaciones del revestimiento y/o fisuras y grietas en la fachada (Tondelo y Barth, 2019).

Actualmente en Brasil la inspección visual de edificaciones es realizada, en su mayoría, por el método tradicional. El profesional de esta actividad profesional (alpinismo industrial) puede realizar la verificación visual y el registro fotográfico de los principales puntos a ser analizados, no obstante, las variables costo y tiempo son superiores cuando son comparadas con la aplicada con uso de VANT. Según datos divulgados por el Ministerio Público, 40% de los accidentes de trabajo en Brasil están relacionados con las caídas de trabajadores en altura (EXAME, 2018).

Así, esta herramienta denominada VANT se refiere a una clase de aeronaves pilotadas remotamente o de forma automática a través del uso de coordenadas pre-definidas, siendo una tecnología emergente conocida por su papel en aplicaciones militares (Irizarry y Costa, 2016).

Más recientemente, tanto en Brasil como en otros países el uso potencial de esos vehículos aéreos en ambientes civiles se viene haciendo cada día más común en áreas como agricultura, silvicultura, arqueología, arquitectura y construcción civil (Roca et al., 2013; Máthé y Buşoniu, 2015; Morgenthal y Hallermann, 2015; Nikolic et al., 2013; Hung et al., 2018; Yang et al., 2015; De Melo et al., 2017; Falorca y Lanzinha, 2020).

Apenas en el año de 2017 fue publicada por la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC) la normativa brasileña que regula los requisitos generales para las aeronaves no tripuladas de uso civil, la norma de Regulación Brasileña de Aviación Civil Especial – RBAC –E nº 94 (ANAC, 2017). Esta regulación especial establece las condiciones para la operación de VANT en territorio brasileño considerando el estado del desarrollo actual, buscando promover su uso seguro y sustentable.

El uso de VANT en la industria de la construcción civil aún es limitado (Melo y Costa, 2015), aun cuando se perciba que esa tecnología puede ser utilizada de diversas maneras. En este contexto, merece una destacada atención la realización de la inspección visual en construcciones civiles de gran porte para verificar las condiciones de desempeño y determinar medidas preventivas y correctivas que se hagan necesarias, en virtud de la inherente complejidad (altura, tamaño, dificultades de acceso y condiciones exposición). El VANT puede reducir el tiempo de estas operaciones de monitoreo, bien como auxiliar en otros procesos de inspección que pueden colocar en riesgo la vida humana (Álvares et al., 2016).

En este sentido, el objetivo de esta investigación es evaluar el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) como herramienta visual para la inspección de manifestaciones patológicas en fachadas a través de un estudio exploratorio, con el propósito de verificar la viabilidad de su uso y visando el desarrollo de directrices que integran la recolección de imágenes aéreas, procesamiento de datos y análisis visual.

## 2. VANT EN LA INSPECCIÓN VISUAL

Existen diferentes tipos de VANT útiles para el propósito de la inspección visual en la industria de la construcción civil. Entre ellos los sustentados por medio de alas rotatorias, cuando son comparados con los de alas fijas, permiten desplazamientos más rápidos y mayor versatilidad en los vuelos, ellos son efectivos en la recolección de imágenes horizontales en áreas de mediana extensión como fue aplicado en el caso de estudio de Vera (2016).

Del mismo modo, la versatilidad de esta aeronave permite su movimiento en todos los ejes posibles, siendo eficaz en la captura de imágenes verticales simples y verticales oblicuas como es presentado en los casos de estudio de Mader et al. (2016), Morgenthal y Hallermann (2015) y Reagan et al. (2018) en la detección de superficies ó elementos específicos, constituyendo así, una herramienta útil para la inspección visual del cerramiento vertical ó como en el caso de estudio de Irizarry y Costa (2016), una herramienta visual para la gerencia del cantero de obra. En la Figura 1 es presentado el resumen de las principales ventajas y desventajas de los vehículos con alas fijas y rotatorias.

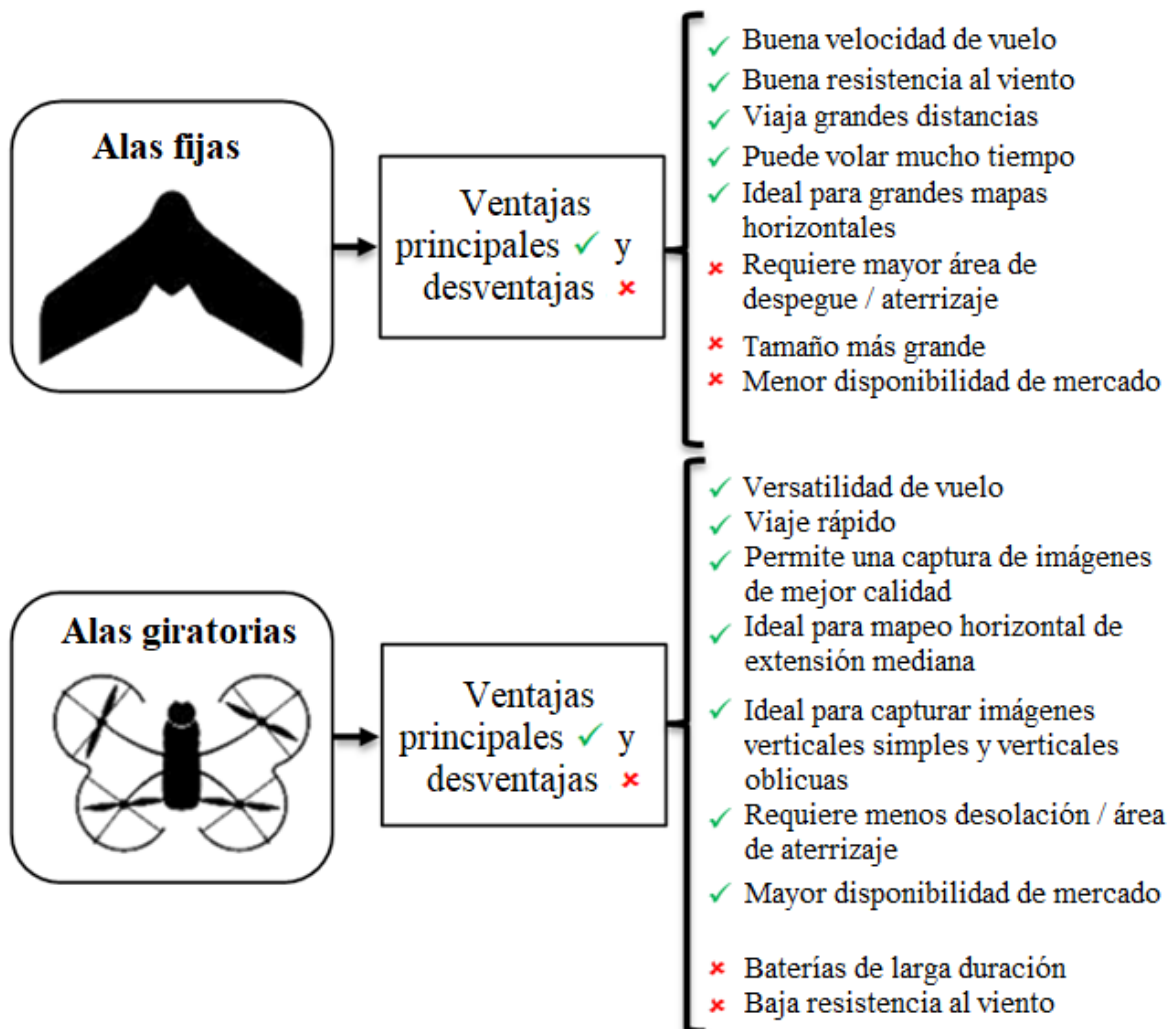


Figura 1. Ventajas y desventajas del VANT en Función al tipo de alas.

Según *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2017) cualquier aeronave destinada a volar sin un piloto a bordo es referida como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Los VANT de alas rotatorias usados en los estudios se ajustan a la clasificación RPAS Clase 3 de la ANAC,



en consecuencia tiene restricciones y requerimientos menores para los vuelos de estas aeronaves, viabilizando su uso en áreas urbanas y canteros de obras (Brasil, 2017).

Del mismo modo esos vehículos comúnmente son simples de pilotar, la sustentación es dada por el conjunto de motores controlados por un sistema electrónico sofisticado que generalmente garantiza una buena estabilidad de la aeronave, que permite despegue y aterrizaje vertical. Por tanto, son la opción principal para cargar cámaras y otros objetos sin grandes desplazamientos del punto de despegue. En la Figura 2 son presentadas las características mínimas sugeridas para el equipo con el propósito de la inspección visual de fachadas.

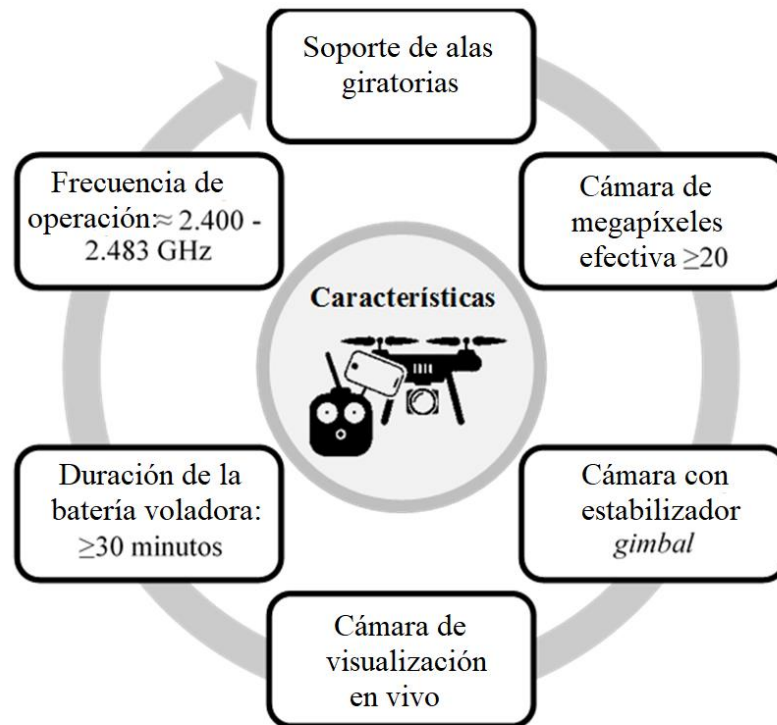


Figura 2. Características mínimas del equipo para la inspección visual de fachadas.

Vale aclarar que la facilidad de adquisición de un VANT actualmente no hace al usuario apto para pilotar el equipo. Existen reglas, normas y procedimientos para hacerse piloto de un Vehículo Aéreo No Tripulado (Aguilar, 2018), éstas son especificadas en las RBAC-E n° 94. Resolución n. 419 (Brasil, 2017).

En los últimos años ha habido un aumento en el uso de VANT para la inspección de estructuras civiles, específicamente edificaciones, debido a su largo alcance, aplicaciones de fotogrametría área, registro eficiente de datos, velocidad, seguridad y reducción de costos entre otros (Izarry y Costa, 2016; Shariq y Hughes, 2020; Grosio et al., 2020). En la Figura 3 las ventajas reportadas del uso de VANT en la revisión bibliográfica son comparadas a uno de los métodos tradicionales más utilizados, o alpinismo.

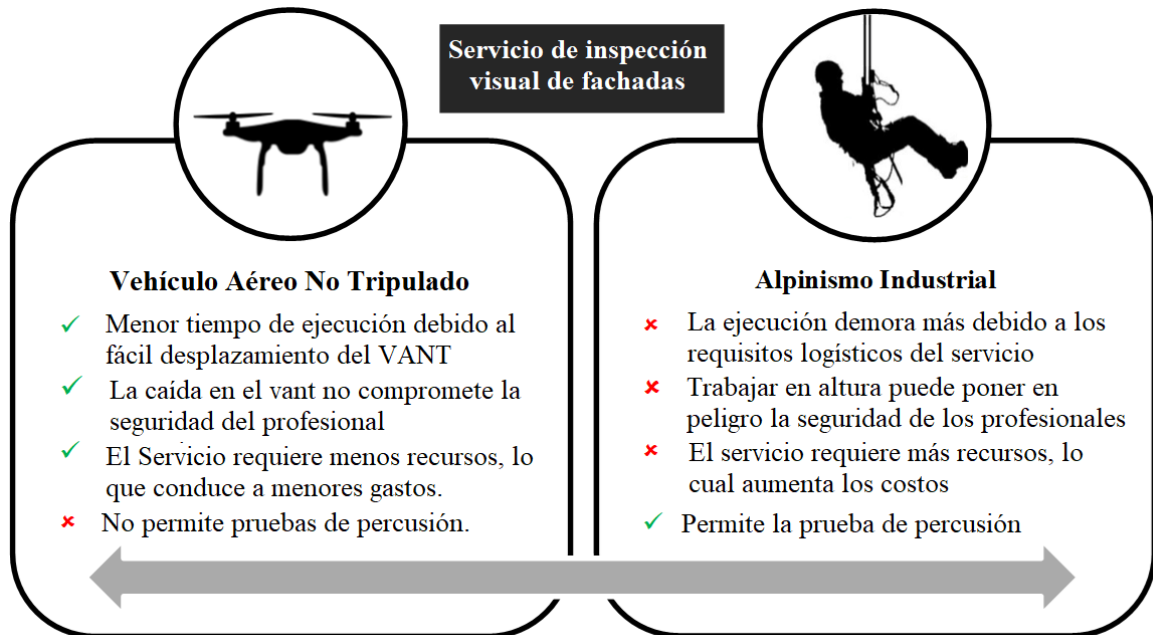


Figura 3. Comparación de procedimientos de inspección visual de fachadas.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Basados en directrices inferidas de la revisión bibliográfica y buscando verificar la viabilidad del uso de VANT para la inspección de manifestaciones patológicas de fachadas, se escogió el Instituto de Innovación Tecnológica (IIT) de la Universidad de Pernambuco. El edificio (Figura 4) del instituto posee cuatro pisos y está localizado en el PARQTEL (Parque Tecnológico de Electroelectrónicos) de Pernambuco, en la urbanización de curado (Figura 4). Esta edificación fue seleccionada por sus características geométricas (múltiples fachadas) y su localización aislada en relación a otros edificios en la localidad, característica ideal para el entrenamiento y perfeccionamiento de los vuelos con el VANT y el desarrollo de los protocolos de vuelo.

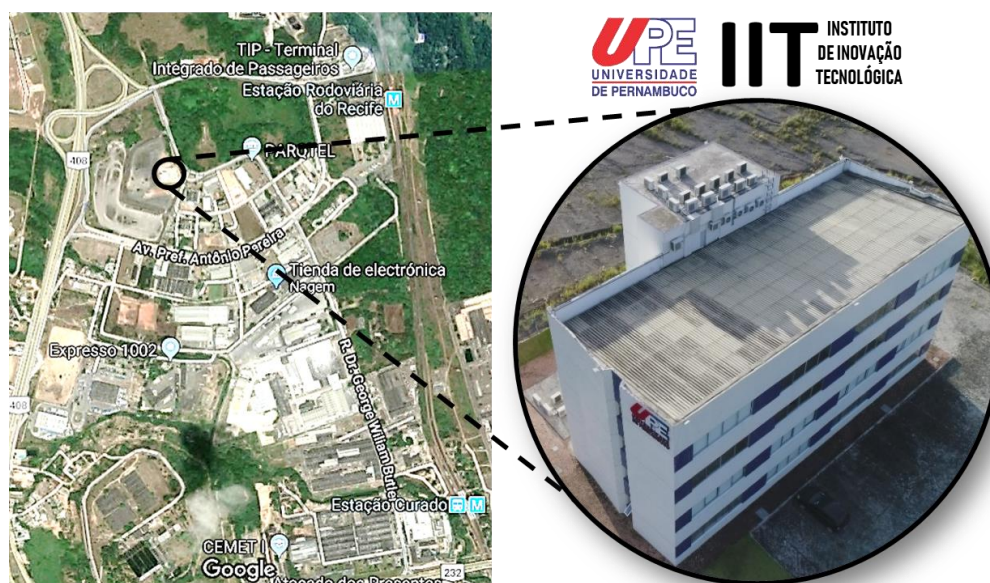


Figura 4. Instituto de Innovación Tecnológica da UPE. Adaptación de Google (2018).

Enseguida, fue realizado el entrenamiento en lo referente a la operación del VANT, en esta fase fueron realizados vuelos de ensayos en la edificación, con el objetivo de recolectar datos y analizar los ítems posibles de ser visualizados a través de los activos visuales obtenidos, a fin de refinar el método de recoleta y los procedimientos técnicos necesarios para que tal operación ocurra dentro de los criterios de seguridad exigidos. En resumen, esta etapa incluyó el entrenamiento de la tecnología, así como la comprensión técnica del equipo a ser usado.

Para la ejecución de los levantamientos de campo, se usó el VANT modelo Phantom 4 Pro V2.0, fabricado por la DJI, equipado con cámara de 1" e 20 MP, siendo capaz de grabar videos en 4K 60 fps (fotos por segundo) y disparar en modo de disparo continuo a 14 fps. Dirigido por un mando a distancia con display HD de alta iluminación incorporada, además de poseer una batería de litio que ofrece 30 minutos de tiempo de vuelo máximo. La Tabla 1 presenta algunas características adicionales del Phantom 4 Pro V2.0.

Tabla 1. Características técnicas del Phantom 4 Pro V2.0

Especificaciones	Phantom 4 Pro V2.0
Peso (batería y hélices incluidas)	1388 g
Tiempo máximo de vuelo	30 min
Sistema de visión	Frente, atrás y abajo
Detección de obstáculos	Delantero y posterior
	Infrarrojo izquierdo y derecho
Sistema de transmisión 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 - ∞
Frecuencia de operación	2,4 GHz/5,8 GHz
	La transmisión de 5,8 GHz no está disponible en algunas regiones debido a las regulaciones locales

Fuente: DJI (2017)

La estrategia de captura de datos siguió los conceptos básicos de fotogrametría digital, visando el paralelismo entre sus posiciones y la perpendicularidad al plano del objeto de interés, como demostrado en la Figura 5, es que cada parte del objeto fuese fotografiado por al menos en dos posiciones diferentes, garantizando la sobre posición de las imágenes (Groetelaars, 2015). Esos aspectos son importantes para maximizar los procedimientos referentes a las correlaciones requeridas para la construcción de orto mosaicos o reconstrucciones tridimensionales.

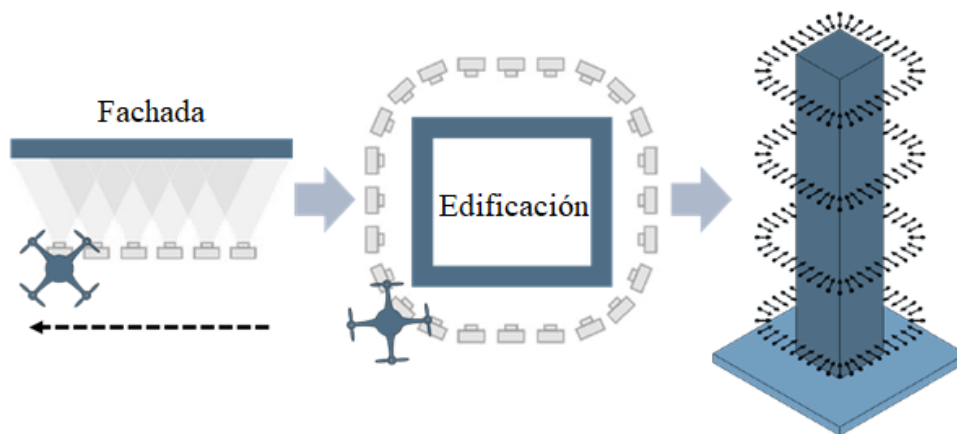


Figura 5. Estrategia para la Captura de imágenes. Adaptación de Melo Jr (2016).

En total fueron realizados 8 vuelos experimentales en 4 ensayos de campo, ya que se contabiliza la realización de un vuelo a cada despegue y aterrizaje, inclusive para el cambio de la memoria SD o recargar la batería.

Los protocolos de las actividades a realizar incluyen, completar el formulario para la reunión de planificación (estandariza la colecta de datos para la elaboración del plan de vuelo, definiendo los puntos de despegue y aterrizaje e indicando las áreas recubiertas para modelaje 3D); y el checklist para la misión con VANT (registro de datos técnicos del vuelo, además de checklist de todos los procedimientos necesarios para la operación del VANT en condiciones adecuadas de seguridad). Los ensayos fueron iniciados en agosto de 2018, resultando en aproximadamente 2 horas y 30 minutos de vuelo para entrenamiento, según lo presentado en la Tabla 2 en la planilla *Flight Log* (relación de todos los datos físicos de los vuelos, registrados en la aplicación a ser adoptada y en el *Checklist* para la misión). Entre las informaciones registradas durante el vuelo por medio de la App DJI Go, se destaca, la cantidad de activos visuales colectados (fotos y videos), distancia, altitud máxima, duración de vuelo, sobre posición fotográfica y velocidad de vuelo.

Tabla 2. Datos de vuelos experimentales (Planilla *Flight Log*)

Nº	Hora	Número de fotos	Distancia (m)	Altitud máxima (m)	Duración de vuelo (min)	Sobre posición fotográfica (%)	Velocidad de vuelo (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. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Luego de la verificación de la calidad de los activos visuales, se evidencia que las fotos tomadas en los vuelos número 2, 6 y 7, presentan una excelente calidad visual y óptima relación de distancias, a 8 m de la fachada, y, en consecuencia, a una distancia entre las estaciones de 1,8 m en sentido vertical y de 3,2 m en sentido horizontal.

Según Ballesteros (2020) y Pierrot-Deseilligny et al. (2011), esa relación entre la distancia de la posición de las estaciones en la toma fotográfica y distancia de las estaciones para la fachada fotografiada resulta ideal para la reconstrucción 3D, visto que se esa relación fuese muy pequeña, la correlación automática de los puntos es facilitada, pero la precisión geométrica en la reconstrucción digital de la fachada se perjudica.

Por consiguiente, las 189 fotografías tomadas a 8 m de la fachada fueron seleccionadas para el procesamiento, las mismas fueron procesadas utilizando la técnica Stereo Matching, siendo el proceso de encontrar puntos correspondientes (Smartmatches) en dos o más imágenes.

Así, la reconstrucción en 3D es posible desde que existan por lo menos 2 imágenes de la misma escena, obtenidas de posiciones diferentes (centros de proyecciones distintos) tal que, conociendo la posición, la orientación y la distancia focal, es posible encontrar la posición de un punto en el espacio a partir de las coordenadas bidimensionales de las imágenes por el principio de la geometría epipolar, logrando encontrar las relaciones geométricas entre los puntos 3D a partir de sus

proyecciones más las imágenes 2D (Melo Jr., 2016).

En otras palabras, el software de digitalización basadas en fotografías compara pequeñas áreas compuestas por un conjunto de Píxeles de la imagen digital presentes en dos o más fotos que a su vez, son formadas por las texturas o marcas de contrastes de la superficie del objeto o escena. El proceso de comparación va hasta el programa encontrar las mejores correspondencias entre las imágenes. Cuando estas correspondencias óptimas o ideales son encontradas, la información de la posición y orientación ya computada para las fotografías es usada para calcular la localización del punto en el espacio.

Para eso el software de Stereo Matching seleccionado para la reconstrucción en 3D fue el *Agisoft PhotoScan*. Esta etapa de investigación tuvo por objetivo la definición de los procedimientos y etapas necesarias para el desarrollo adecuado del mapeamiento 3D y generación de orto mosaicos con uso del VANT. Por consiguiente, la correspondiente secuencia de las etapas de procesamiento en el *software Agisoft PhotoScan* y los parámetros utilizados en dicho procesamiento es descrito en la Tabla 3.

Tabla 3. Flujo de trabajo y parámetros usados *Photo Scan Agisoft*.

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

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera etapa del procesamiento consistió en el alineamiento de las imágenes (*Align Photos*), en el cual *Agisoft PhotoScan* busca semejanzas entre las imágenes. El resultado final es la generación de la nube de Tie Points o puntos de amarre, ella es el producto básico para la generación de la nube de puntos densificados, modelos 3D y punto de conexión entre las orto fotos en el proceso de mosaico y generación de las orto fotos.

En esta etapa también fueron insertados los puntos de apoyo colectados en campo utilizados para mejorar la precisión posicional de la nube de puntos, seguido de la eliminación de los puntos no deseados o ruidos, como: las áreas de superficie mal capturadas, áreas pertenecientes a otros objetos y puntos distantes. Obteniendo como resultado final de esta etapa el modelo presentado en la Figura 6, una nube de puntos escasa o de baja densidad, que también define la geometría de la edificación. En la segunda etapa fue construida la *Dense Cloud* ó nube densa de puntos 3D con el filtrado de los puntos no deseados o ruidos. Así, a partir de las posiciones estimadas de la cámara, el software calcula las informaciones de profundidad para cada cámara para ser combinadas en un único punto de la nube densa.

En la configuración de la densificación se seleccionó en el nivel más alto, generando más de 22 millones de puntos. La principal función de esta etapa es densificar la nube de puntos generada en el proceso anterior, básicamente el software va a aumentar la cantidad de puntos de la nube de puntos disminuyendo los espacios vacíos para representar mejor el área mapeada, el modelo generado en esta etapa es presentado en la Figura 7, con la mayoría de los detalles geométricos de la edificación reconstruidos digitalmente.

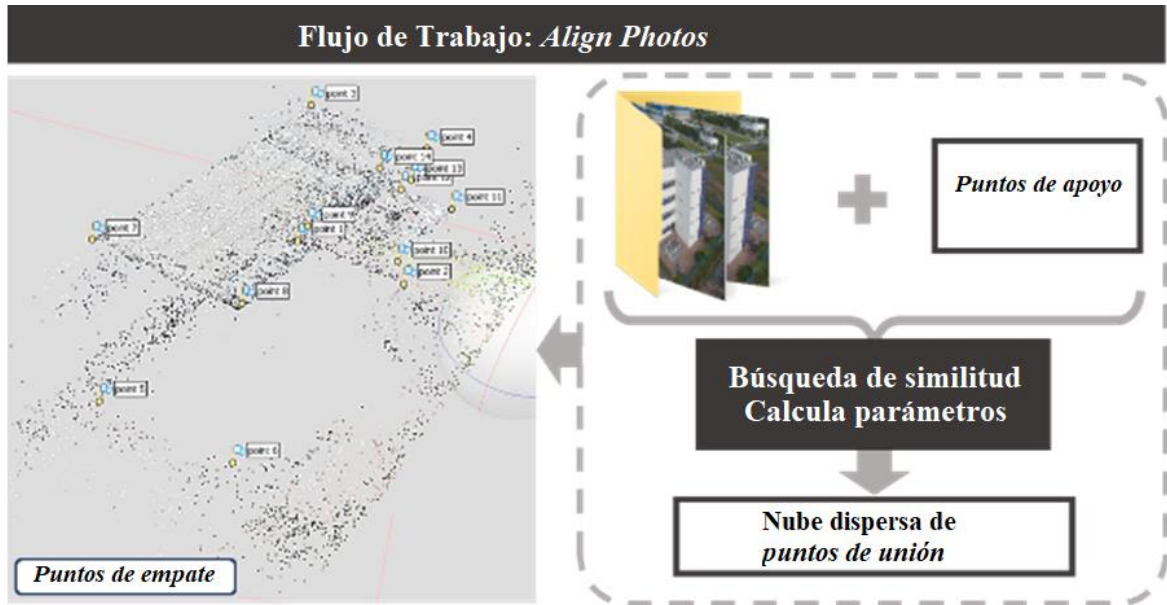


Figura 6. Nube de *Tie Points* IIT-UPE.

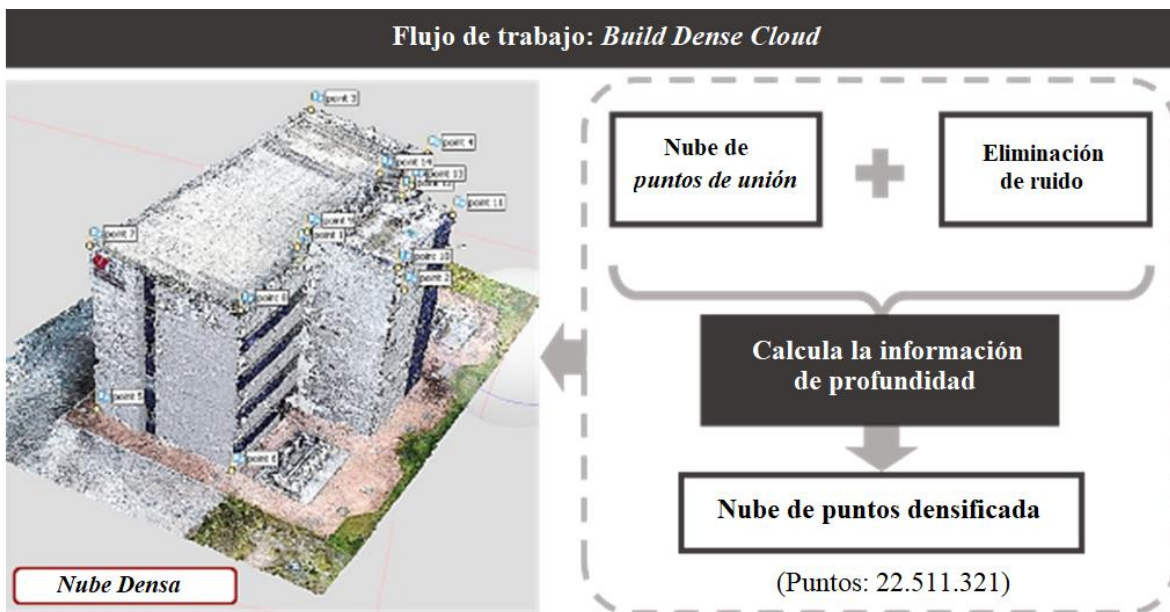


Figura 7. Nube de puntos Densificada IIT-UPE.

En la tercera etapa fue construida la *Mesh* o malla, generada a partir del agrupamiento de vértices de la nube densa de puntos. El modelo 3D generado en esta etapa es presentado en la Figura 8, con más de 500 mil caras o polígonos adyacentes, compartiendo aristas de la superficie de frontera del objeto.

Note que la cantidad necesaria de las caras para un modelo estará relacionada al nivel de detalle

que se espera de un modelo y cuanto mayor es ese nivel, mayor también será el costo computacional, es decir, tiempo necesario para el procesamiento y desempeño requerido del hardware. Si el modelo es generado a partir de la nube de puntos escasa, naturalmente la cantidad de caras y vértices se reducirá.

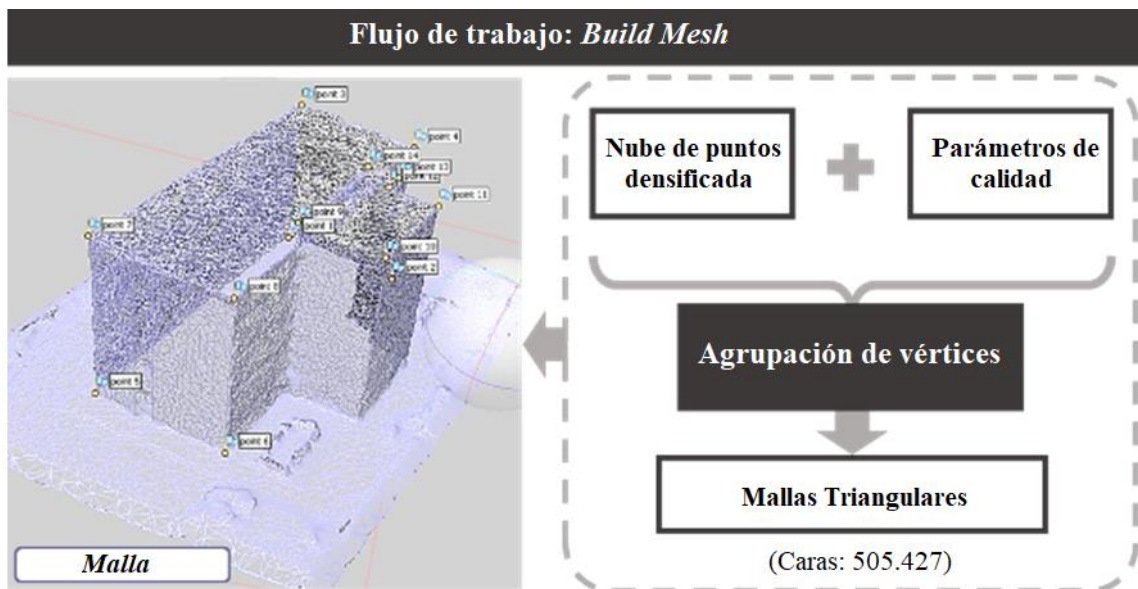


Figura 8. Modelo de Malhas Triangulares IIT-UPE.

En la quinta y última etapa, para generar el orto mosaico inicialmente fue realizado el proceso de orto rectificación de las imágenes, donde las características de las imágenes son proyectadas ortogonalmente, con escala constante, no presentando desplazamientos debidos a la inclinación de la cámara. Con las imágenes debidamente corregidas el software realiza el mosaico de las orto fotos y crea un único producto.

En la cuarta etapa, el objetivo es solamente aplicar una textura en el modelo tridimensional para mejorar su aspecto visual, con el propósito de permitir la visualización de fallas en la fachada. El modelo 3D texturizado generado en esta etapa es presentado en la Figura 9.

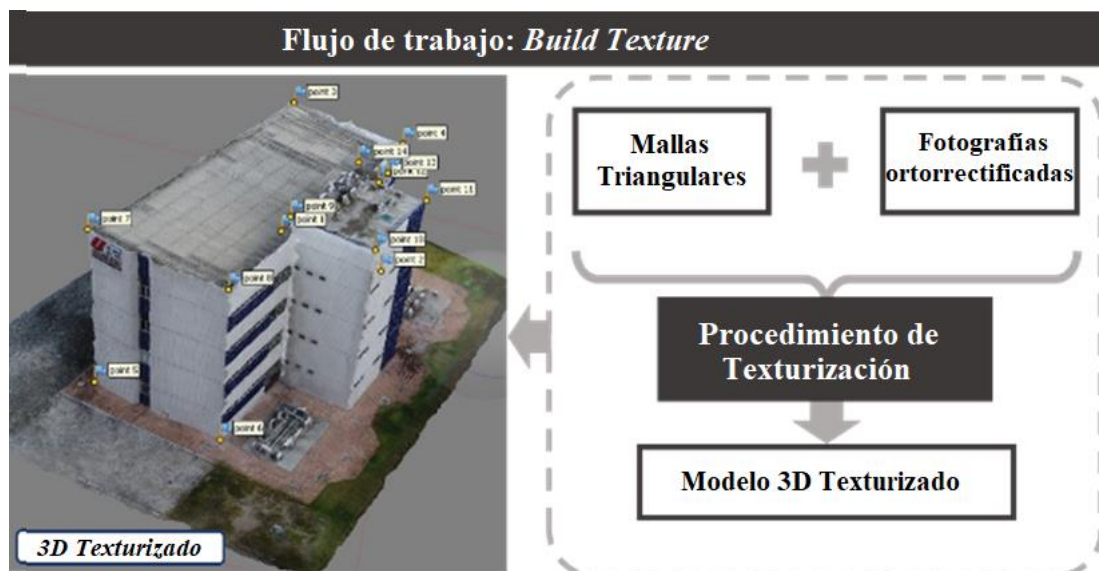


Figura 9. Modelo Texturizado IIT-UPE.

El software *Agisoft PhotoScan* permite que orto mosaicos sean exportados a partir de los modelos generados anteriormente. Para ejemplificar, la Figura 10 presenta el orto mosaico correspondiente a la fachada Sur de la edificación IIT.

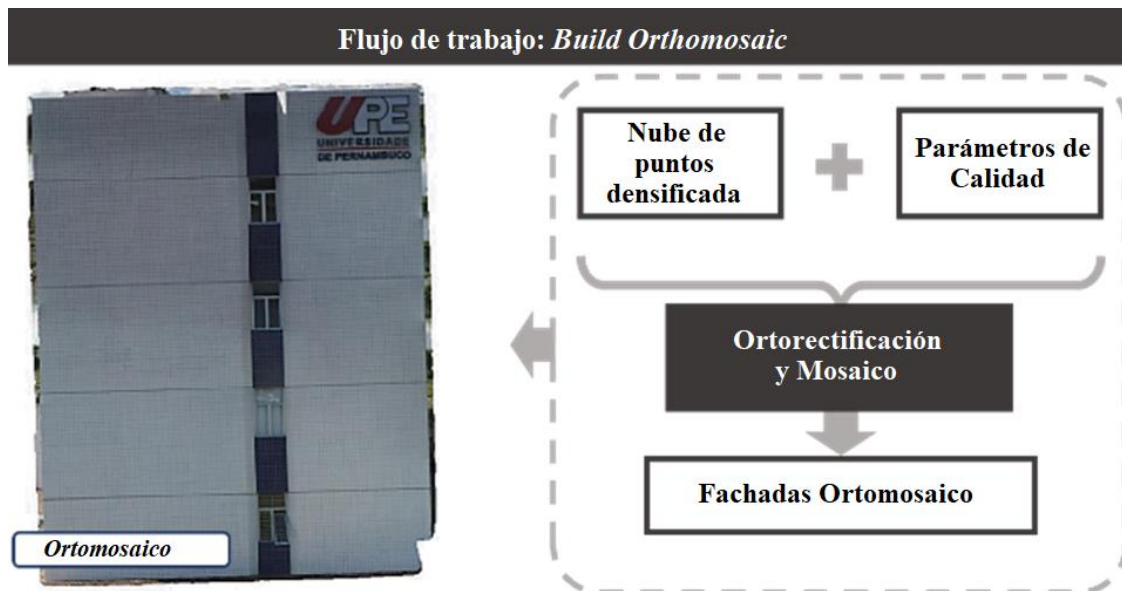


Figura 10. Modelo Orto mosaico de la Fachada Sul IIT-UPE.

El producto final del procesamiento proporcionó el modelo digital 3D mostrado en la Figura 11, con resultado satisfactorio en términos de su reconstrucción geométrica, es exportable en varios formatos para sus diversos usos, de acuerdo con la aplicación que se desea.

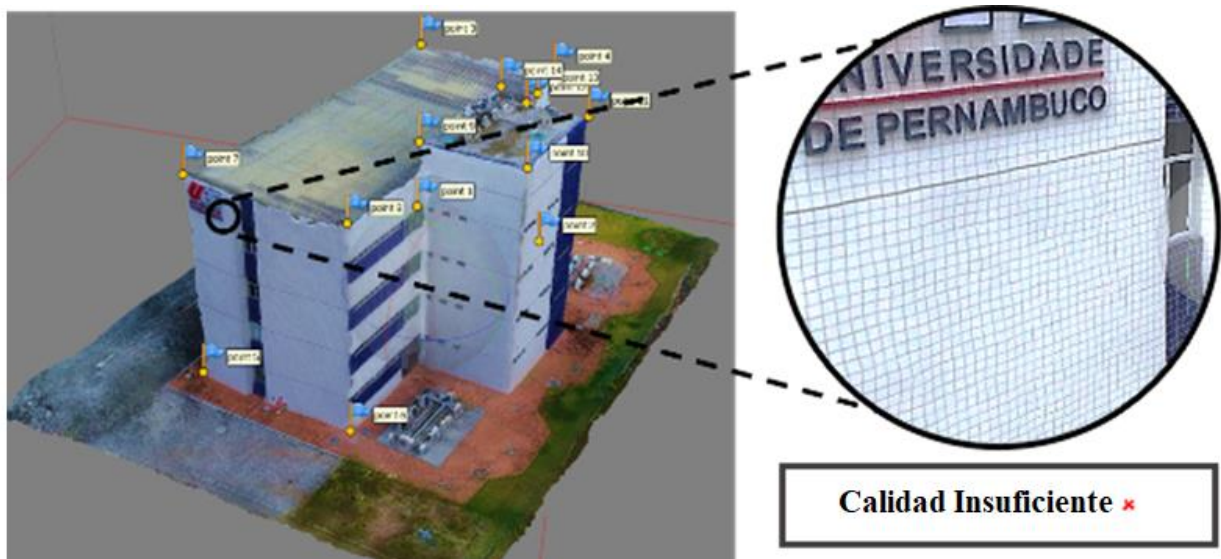


Figura 11. Producto final Modelo 3D Texturizado IIT-UPE

Entre tanto, la calidad de este modelo es insuficiente para el propósito de detección de fallas en las fachadas, esto es debido a que el modelo presenta distorsiones en fachadas texturizadas. Autores como Roca et al. (2018) y Rakha y Gorodetsky (2018) también generaron modelos 3D en sus respectivos estudios, destacando algunas limitaciones. Rodríguez-Gonzalvez et al. (2014) también señalan que la reconstrucción 3D posee limitaciones en cuanto a calidad e integridad de la estructura inspeccionada.



Para un resultado más perspicaz, fueron criados los orto mosaicos de cada fachada de la edificación. Esas imágenes orto rectificadas alcanzan la calidad suficiente para el procedimiento de detección de manifestaciones patológicas por inspección visual.

Eso es demostrado en la Figura 12, en la cual el orto mosaico de la fachada sur permitió el descubrimiento de fisura del revestimiento cerámico, inicio de eflorescencia en la fachada y, fallas surgidas de procesos biológicos (Moho).

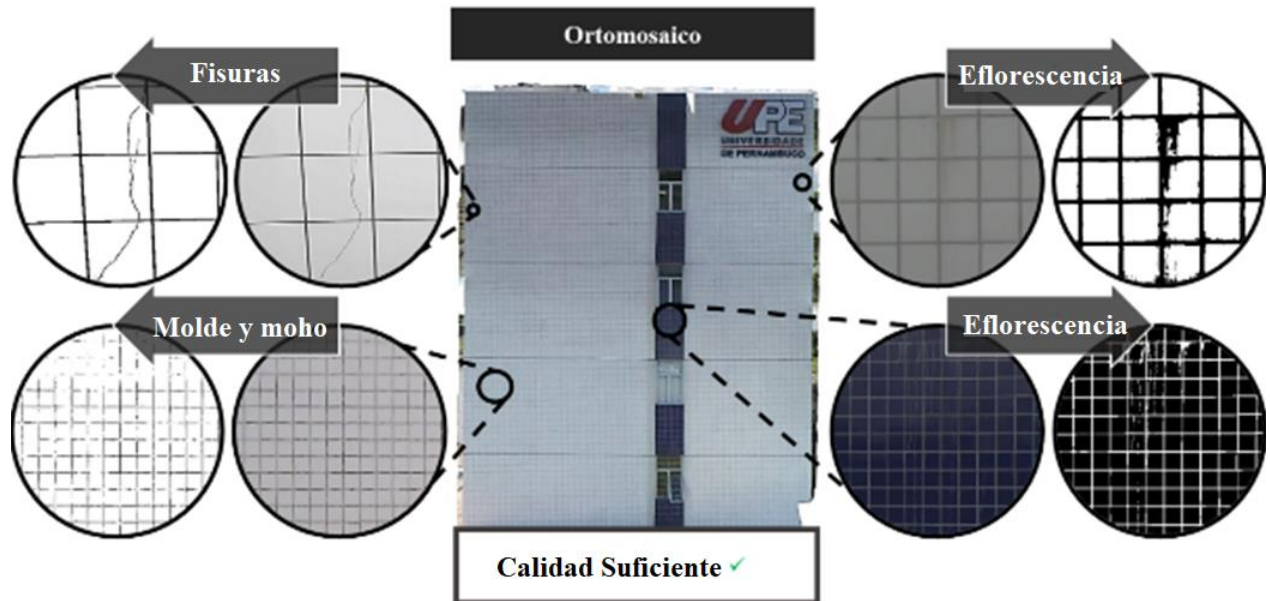


Figura 12. Detección de Manifestaciones Patológicas en la Fachada Sur IIT-UPE.

Finalmente, luego de la elaboración de la revisión bibliográfica y el desarrollo del estudio experimental, se percibe la viabilidad del uso de VANT para o servicio de detección de manifestaciones patológicas en fachadas, como también fue reportado en la investigación de Tondelo y Barth (2019).

El uso de VANT para la inspección de fachadas se presenta como una alternativa al método tradicional, proporcionando las informaciones necesarias para el diagnóstico de estructura. Los resultados son obtenidos cuando se dispone de un VANT con multi rotor y una cámara HD, según lo utilizado en la presente investigación e indicado por Falorca y Laninha (2020).

A pesar de que el presente estudio se haya limitado al uso de VANT como herramienta visual para la inspección de manifestaciones patológicas de fachadas; sin embargo, el uso de diferentes técnicas, como técnicas de aprendizaje profundo (*deep learning*) pueden ser combinadas para auxiliar y automatizar la inspección visual, según propuesta de Ruiz et al. (2021).

Se observa la necesidad de creación de un procedimiento que permita estructurar paso a paso la técnica para el servicio de la inspección visual de fachadas con uso de esta tecnología. El procedimiento abarcaría un protocolo de vuelo adecuado para esos fines además de idealizar las etapas de captura, almacenamiento, procesamiento y post procesamiento de datos. Por consiguiente, se conseguiría garantizar las ventajas vislumbradas de este procedimiento en relación al modelo tradicional de inspección, que incluye alpinismo industrial.

## 6. CONCLUSIONES

Luego de la elaboración de este estudio, se percibió la importancia de la elección correcta del VANT para las diferentes funciones que puede cumplir, ellos presentan grandes ventajas y desventajas de acuerdo a las diferentes características de diseño, principalmente en función del tipo de sustentación: por alas rotatorias o alas fijas. Para el caso específico de inspección visual de fachadas, como ya fue abordado, son ideales los vehículos con alas rotatorias, cardán y cámara aérea, permitiendo agilidad y calidad en la filmación y captura de imágenes en alta resolución (*high definition* - HD) de los diferentes puntos del cerramiento vertical o elemento de análisis. Así, ese procedimiento preciso puede exponer problemas no observados a simple vista de planta baja, como, por ejemplo: filtraciones, desprendimiento, moho, grietas y fisuras en el revestimiento.

La conveniente referencia de este tipo de VANT en la legislación brasileña y sus restricciones menores, permiten la comercialización en más accesibles al público. También es recomendado verificar que el vehículo cumple las características mínimas antes discutidas. En la actualidad el VANT comercial aún tiene limitaciones técnicas, principalmente en la duración da batería y capacidad de carga, por tanto, se observa que las perspectivas futuras apuntan al desarrollo continuo de esta tecnología, mitigando así dichas limitaciones y ampliando el escenario de esta tecnología dentro de la industria de la construcción civil.

De acuerdo con el procedimiento experimental y los resultados preliminares, cabe destacar que el *software Agisoft PhotoScan* permite un amplio rango de operación en cuanto a la calidad del resultado, desde resultados de baja resolución a resultados altamente elaborados, con un costo computacional creciente en este sentido.

En lo que respecta al análisis de la calidad de los mapeamientos 3D desarrollados, en adecuación al uso propuesto, con base en resultados obtenidos es posible afirmar que la calidad de los modelos 3D texturizados aún no alcanzan la calidad suficiente para el propósito de detección de patologías en las fachadas, a pesar de que su uso aún no haya sido descartado, a partir del precepto que esa calidad puede ser mejorada con cámaras más potentes y procedimientos de captura de imagen más entrenados. Por otro lado, los orto mosaicos generados a partir de estos modelos, tienen la calidad requerida para la inspección visual. En fin, los activos visuales obtenidos apuntan a que ambos pueden ser adecuados para el uso propuesto, presentando resultados generales de satisfacción.

Hay evidencias suficientes que enfatizan las diferentes ventajas del uso de este vehículo como herramienta eficiente y flexible para la inspección en la industria de la construcción civil. Esas ventajas permiten un servicio con mayor seguridad, mayor velocidad y costos más bajos, exigiendo menos recursos comparando con el método tradicional de alpinismo industrial. Así, con el desarrollo cada vez mayor de esta tecnología, aliada a otros tipos de cámaras y sensores, permite el acceso a locales antes inaccesibles al ser humano y a otras tecnologías, vislumbrando su uso no apenas a la inspección visual de fachadas, pero también en otras áreas de la construcción civil.

## 7. AGRADECIMIENTOS

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


## 8. REFERENCIAS

- 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](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, Universidad 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>
- Rodriguez-Gonzalvez, P., Gonzalez-Aguilera, D., Lopez-Jimenez, 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](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>

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

V. Alegre<sup>1\*</sup>, S. Villalba<sup>2</sup> 

\*Autor de Contacto: [info@cotca.com](mailto:info@cotca.com)

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

Recepción: 14/11/2019 | Aceptación: 30/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

### RESUMEN

Se discute el ejemplo de un caso real en el que, sobre un túnel existente que se instrumenta con fibra óptica, se construye un edificio. Ello permite hacer el seguimiento de la historia de cargas de una estructura desde que se coloca la fibra óptica. Para constatar que no se ve afectado estructuralmente el túnel durante el período de construcción, se instrumentan secciones del mismo 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.

**Citar como:** Alegre, V., Villalba, S. (2021), "Avances en la instrumentación de estructuras con fibra óptica. El presente de una instrumentación con futuro", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 105 – 122, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

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

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

#### Contribución de cada autor

En este trabajo el autor V. Alegre contribuyó en la gestión de convencer a la administración de las ventajas de este tipo de aplicaciones, y en el proceso de implementación en obra de la fibra óptica, definición de la zona idónea en función de las posiciones del edificio y del túnel, y puesta en marcha. El autor S. Villalba desarrolló el modelo utilizado para la interpretación de resultados, realizó el plan de lecturas previsto en función de las fases de obra y analizó e interpretó los resultados obtenidos y las conclusiones de los mismos a lo largo de todo el proceso de obra.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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

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

### **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.

**Palabras clave:** fibra ótica; instrumentação; túneis; microdeformações.

#### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un problema técnico frecuente es la interacción entre las obras de nueva construcción y las infraestructuras existentes. Las distintas partes de una infraestructura se gestionan para una vida útil determinada, como es el caso de la Red de Metro de Barcelona, cuyo estado actual se definió de forma ordenada entre 2000 y 2003 dejando, entre otros documentos, un túnel virtual de los 92 km de entonces, con la geometría de la sección transversal y el catálogo de daños y disfunciones para su gestión. Los primeros kilómetros de túnel son de 1924 y, lógicamente, la administración responsable (Generalitat de Catalunya) y el ente que lo gestiona (Transports de Barcelona, S.A.) obligan a que en los nuevos edificios construidos dentro del área de influencia de su infraestructura se compruebe que no afectan al uso y servicio de la red, ni a su estructura. Para ello, entre otras cosas, exige que se evalúe estructuralmente la zona afectada facilitando la información estructural de que dispone, y que se registren los movimientos que se producen en la infraestructura durante la construcción de la nueva obra, actuando en consecuencia.

Para realizar este seguimiento, se realizan en ocasiones mediciones con teodolitos monitorizados de varios puntos de la sección transversal. Si se desea más precisión para evaluar los riesgos, una herramienta muy válida es la tecnología de la fibra óptica que, adherida a la superficie, permite medir microdeformaciones en, por ejemplo, las secciones transversales centímetro a centímetro.

Esta tecnología consiste en el uso de un reflectómetro óptico de retrodispersión denominado sistema OBR (Optical Backscatter Reflectometer) como una herramienta de monitorización, en este caso, de una estructura de hormigón armado de un túnel con dovelas de la Línea 9 en Barcelona, que podría presentar fisuras o disfunciones en estado de servicio, como consecuencia de la construcción de un edificio que se realiza parcialmente sobre dicho tramo de túnel.

La principal característica del sistema OBR es su gran sensibilidad y alta resolución espacial a través del uso de fibra óptica como sensor. Lo anterior, produce registros de deformaciones en los cuales se puede identificar y localizar la presencia de fisuras.

Sobre ese túnel se va a realizar un edificio, habiéndose modelado todo el proceso: vaciado, losa de cimentación, ejecución de la estructura y puesta en carga de todos los subsistemas que forman parte del edificio (fachadas, pavimentos, tabiquería, instalaciones, ...).

Para estas etapas de carga, se establecen los valores esperados, y se crea un plan de contingencias con avisos, alertas y alarmas para el caso de que se sobrepasen. A medida que va avanzando la obra, la instrumentación realizada en el túnel con la fibra óptica va registrando los valores obtenidos de forma continua o semicontinua, lo cual permite conocer en cada momento las posibles disfunciones que se producen en la sección (ovalizaciones, microdeformaciones, nuevas fisuras, etc.) y actuar en consecuencia. El período previsto para la ejecución de la obra son 18 meses, una vez acabada la obra se podría mantener la instrumentación y hacer lecturas cuando por ejemplo se produjeran incidencias y se quisiera valorar su repercusión en la estructura del túnel del cual se va obteniendo su “historia de cargas”.

La fibra óptica, que como sistema de monitorización continua es resistente al agua y a la corrosión, soslaya problemas de interferencias electromagnéticas y corrientes parásitas que se producen en otras técnicas, y permite lecturas simultáneas de hasta 5000 puntos de la estructura en estudio.

El objetivo de este trabajo es constatar que no se ve afectado estructuralmente un túnel durante el período de construcción de un edificio, a través de la instrumentación de secciones del primero en las que se miden las microdeformaciones que se producen, y que se comparan con las del modelo. De esta manera, se podrán apreciar las ovalizaciones y tensiones en la bóveda durante las distintas fases del proceso constructivo.



## 2. MODELIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL TÚNEL

La modelación de las distintas etapas se realizó con el programa SAP2000 y el PLAXIS de dos dimensiones, y dio, a partir de la geometría definida en la Figura 1, los siguientes resultados indicados en la Tabla 1 y Figura 2:

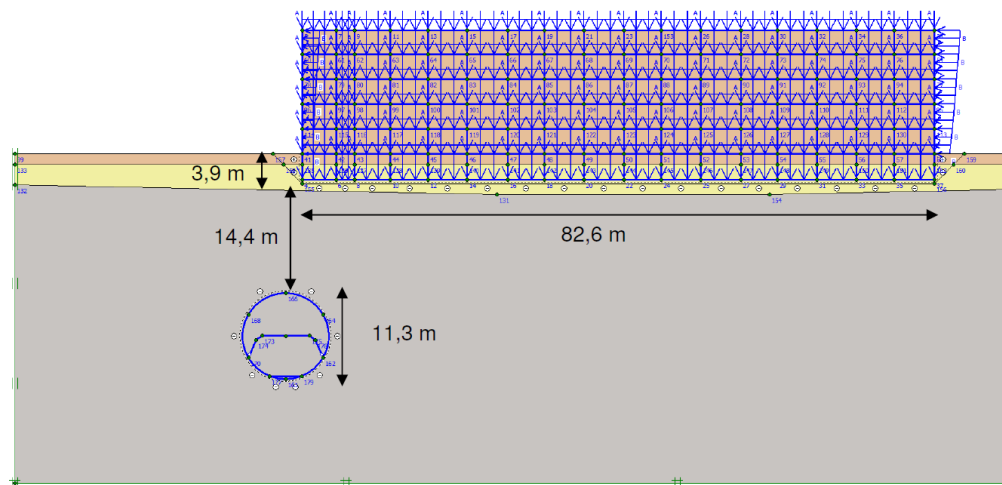


Figura 1. Geometría de la sección de cálculo.

Tabla 1. Resultados obtenidos en el modelo

	En situación actual	Fase de excavación de aparcamiento	Fase de explotación del edificio
<b>Esfuerzos en revestimiento del túnel</b>			
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
<b>Desplazamientos máximos en el túnel</b>			
Horizontal (mm)	0 (*)	1,49	-2,98
Vertical (mm)	0 (*)	1,63	-7,18

(\*) La situación actual se adopta como situación de referencia, es decir, estado de deformación 0.

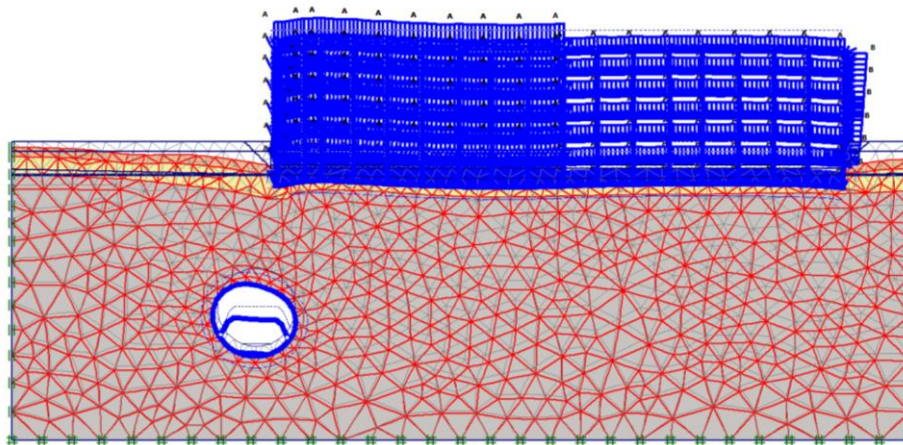


Figura 2. Primer mecanismo de rotura encontrado, para un factor de seguridad de 2,29.

Como consecuencia de lo anterior se estableció un plan de contingencias que se resume en la Tabla 2:

Tabla 2. Tensiones y deformaciones máximas en dovelas. Plan de contingencias.

	Valores de las zonas de compresión		Valores de la zona de tracción
	Dovelas		Dovelas
	$\Delta\sigma$ (Mpa)	$\Delta\mu\epsilon$	Ancho de fisura $\Delta\delta$ (mm)
Aviso	18.40	755	0.50
Alerta	28.40	955	1.80
Alarma	33.40	1595	3.50

El túnel instrumentado de la L9 es una sección típica con vías superpuestas y losa intermedia. La fibra óptica se ha colocado en el perímetro de la sección transversal, siempre de acuerdo con la Propiedad. La Figura 3 muestra su colocación. La colocación de fibra se ha llevado a cabo siguiendo el perímetro de una sección transversal en la posición indicada en planta.

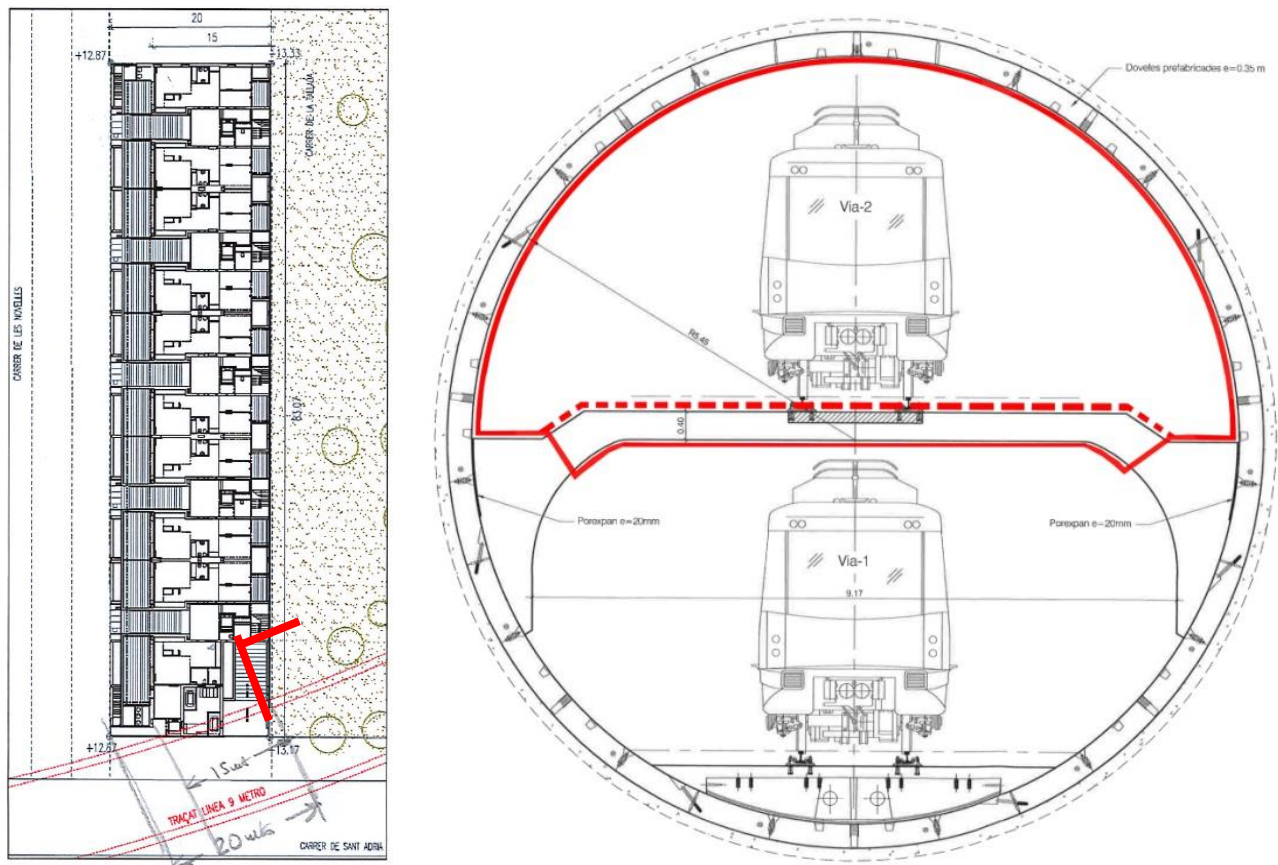


Figura 3. Planta de detalle del edificio con relación al túnel del metro y sección del trazado de la fibra óptica.

La instrumentación planteada mide microdeformaciones en la sección transversal del túnel, es decir, los posibles movimientos o disfunciones de la sección transversal.

En la lectura inicial de ceros con la fibra óptica se hace un catálogo de las disfunciones actuales (fisuras, humedades, coqueas, rugosidades anómalas, etc.). La Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 muestran algunas de las disfunciones detectadas en la toma de datos inicial.



Figura 4. Juntas en la losa de vías, que existen cada 25m.



Figura 5. Filtraciones (lixiviaciones de las cales del cemento).



Figura 6. Rugosidad y pernos de sujeción que podrían afectar a la colocación de la fibra.

En cada lectura posterior planteada en las diferentes fases de la obra (previa al inicio, vaciado, finalización de la cimentación, estructura y fin de la obra), se miden las microdeformaciones en los perímetros de las secciones transversales, se comparan con el modelo realizado y se emiten informes. Cuando se sobrepase los criterios de ovalización prescritos en la normativa o se detecten disfunciones, se actuará de acuerdo con el protocolo del plan de contingencias establecido.

Lo anterior permite detectar los principales cambios en el comportamiento estructural del túnel y obtener información que servirá para evaluar su seguridad estructural, durante la construcción del edificio, al final de las obras y a lo largo de su vida útil.

## 2.1 Esquemas de posicionamiento

Todo el sistema de monitorización se ha situado en la zona estratégica susceptible a la posible dinámica y evolución de la respuesta estructural (variaciones de microdeformaciones-tensiones, movimientos, posibles incrementos y/o desarrollo de mapas de fisuración, etc.) del túnel a lo largo de los trabajos de construcción del edificio. Este sistema de instrumentación ha sido seleccionado considerando las condiciones de trabajo a las que estará sometido (variación térmica, condiciones de uso, etc.).

A continuación, se muestra el alcance de la monitorización empleada (ver Figura 7).

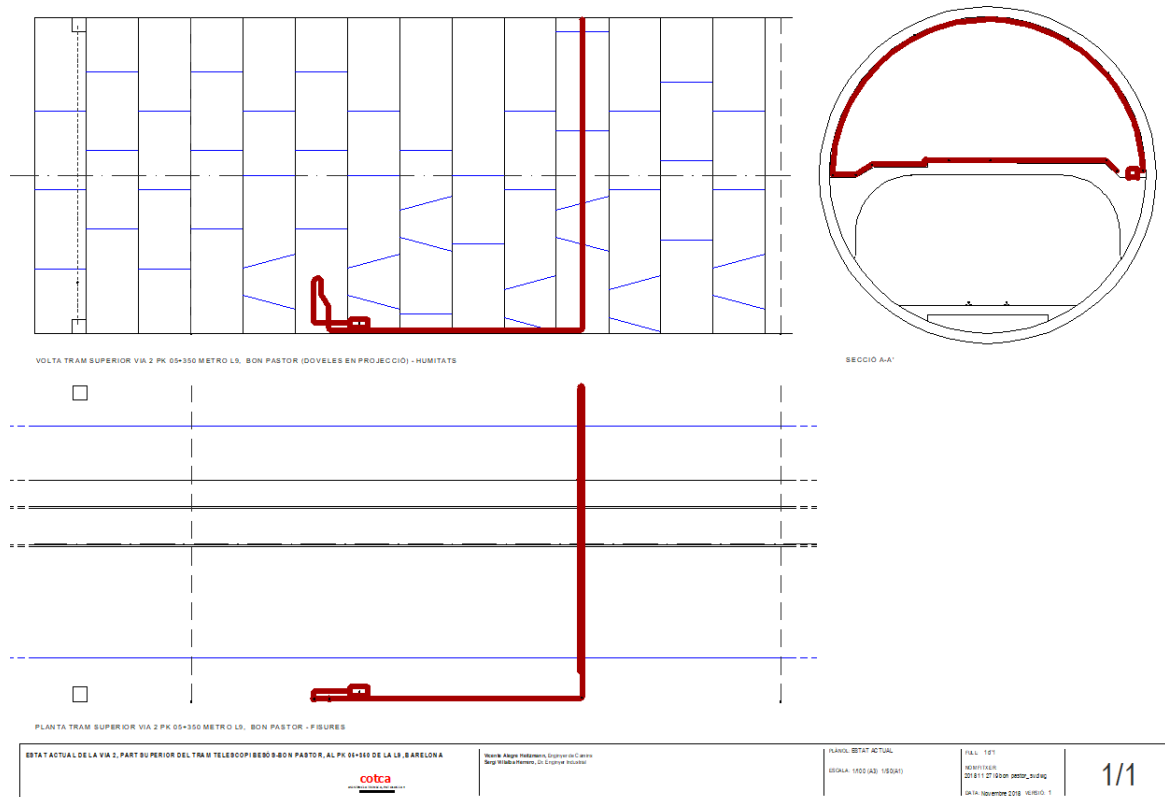


Figura 7. Esquema general del túnel. Alzado y planta. La línea roja indica el recorrido de la fibra óptica.

La longitud real de monitorización del túnel se ajusta a la longitud real de una sección transversal y un tramo longitudinal, siendo ésta una distancia de 50.00m de longitud. Es decir, la fibra óptica FOD1 (Fibra Óptica Distribuida) se encuentra adherida 40m y los últimos 10m se mantuvieron en el carrete que contiene la fibra óptica (sin adherir), el cual se fijó a la estructura con cinta americana. Este detalle se observa en las Figura 8, Figura 9 y Figura 10, junto con el sistema instalado dentro de la sección transversal del túnel.



Figura 8. Carrete de fibra óptica restante sujeto a la estructura y ODiSI (Optical Distributed Sensor Interrogator, de LUNA Technologies, Model A50) en funcionamiento.



Figura 9. Vista general del túnel en la sección instrumentada.



Figura 10. Fibra óptica protegida bajo las vías del tren.

En la Figura 11 se visualiza el procedimiento de adherencia realizado con la fibra óptica en la losa del carril de circulación de la vía 2 y en la bóveda del túnel.



Figura 11. Procedimiento de adherencia de la fibra óptica en la losa del carril de circulación de la vía 2 y en la bóveda del túnel.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1 Resultados del modelo

Se han obtenido tensiones y desplazamientos en el túnel antes, durante y después de la construcción del edificio mediante un método de cálculo por elementos finitos en hipótesis de deformación plana. El programa informático empleado es el PLAXIS v8.

A continuación, se detallan los resultados más significativos obtenidos a partir de la monitorización planteada. La Figura 12 muestra el tramo de sección del túnel con la tramificación de la FOD.

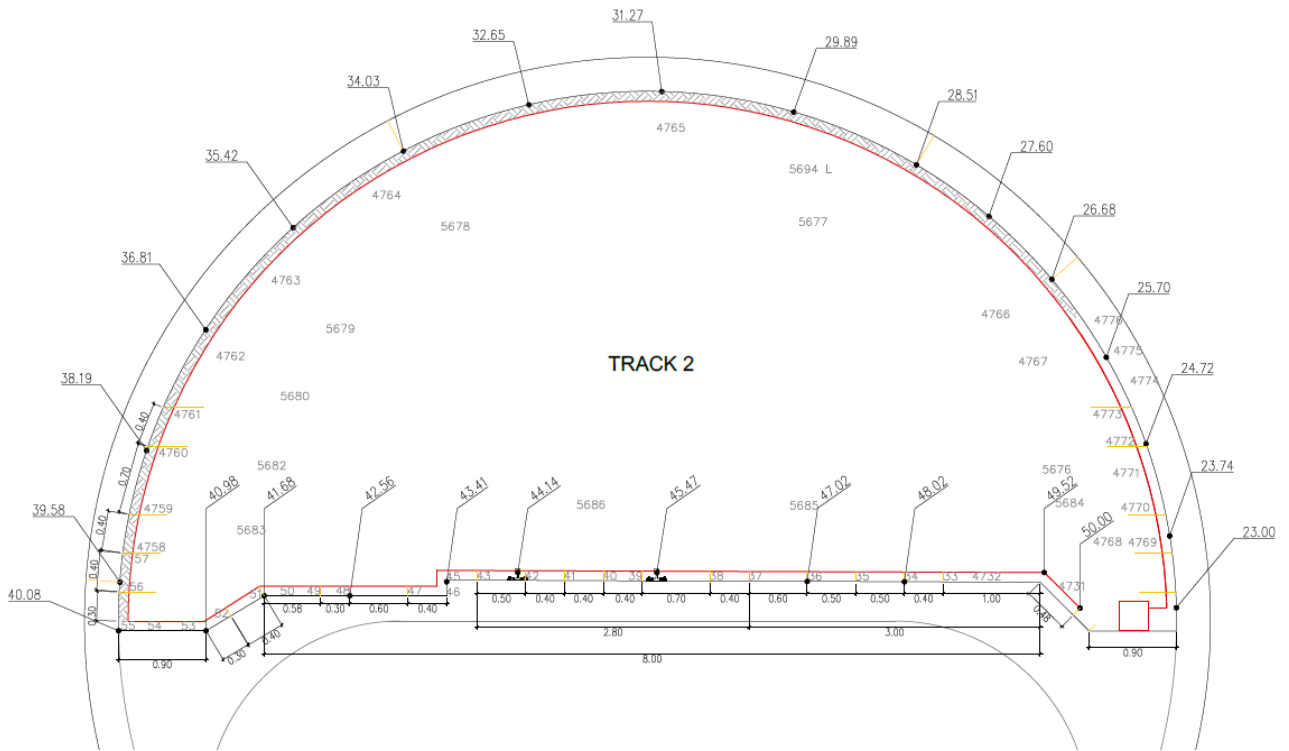


Figura 12. Tramo de sección del túnel y tramificación de la FOD.

La siguiente Tabla 3 muestra la identificación de las Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17 con el proceso de obra realizado:

Tabla 3. Identificación de figuras.

Figura	Proceso de obra	Día / Rango de días	Longitud de FOD
Figura 13	Estado inicial	4 oct.	Longitud total: 50 m
Figura 14	Pre-excavación	7 oct.	Longitud total: 50 m
Figura 15	Excavación	18 oct. – 07 nov.	Longitud total: 50 m
Figura 16	Hormigonado cimentación	13 dic.	Longitud total: 50 m
Figura 17	Evolución temporal	4 oct. – 17 may.	Longitud total: 50 m

**ESTADO INICIAL**

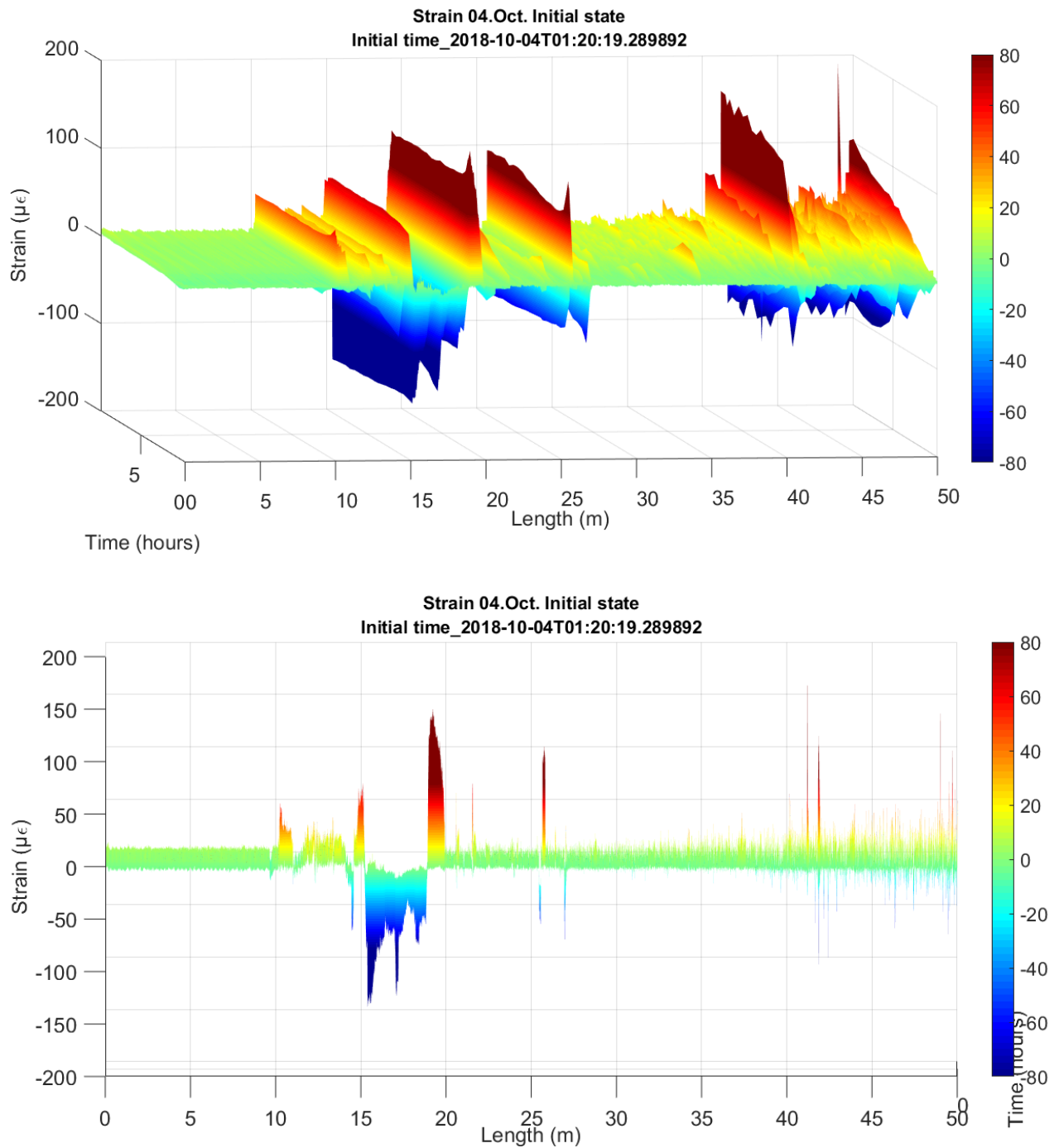


Figura 13. Estado inicial y de calibrado. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.



**PRE EXCAVACIÓN**

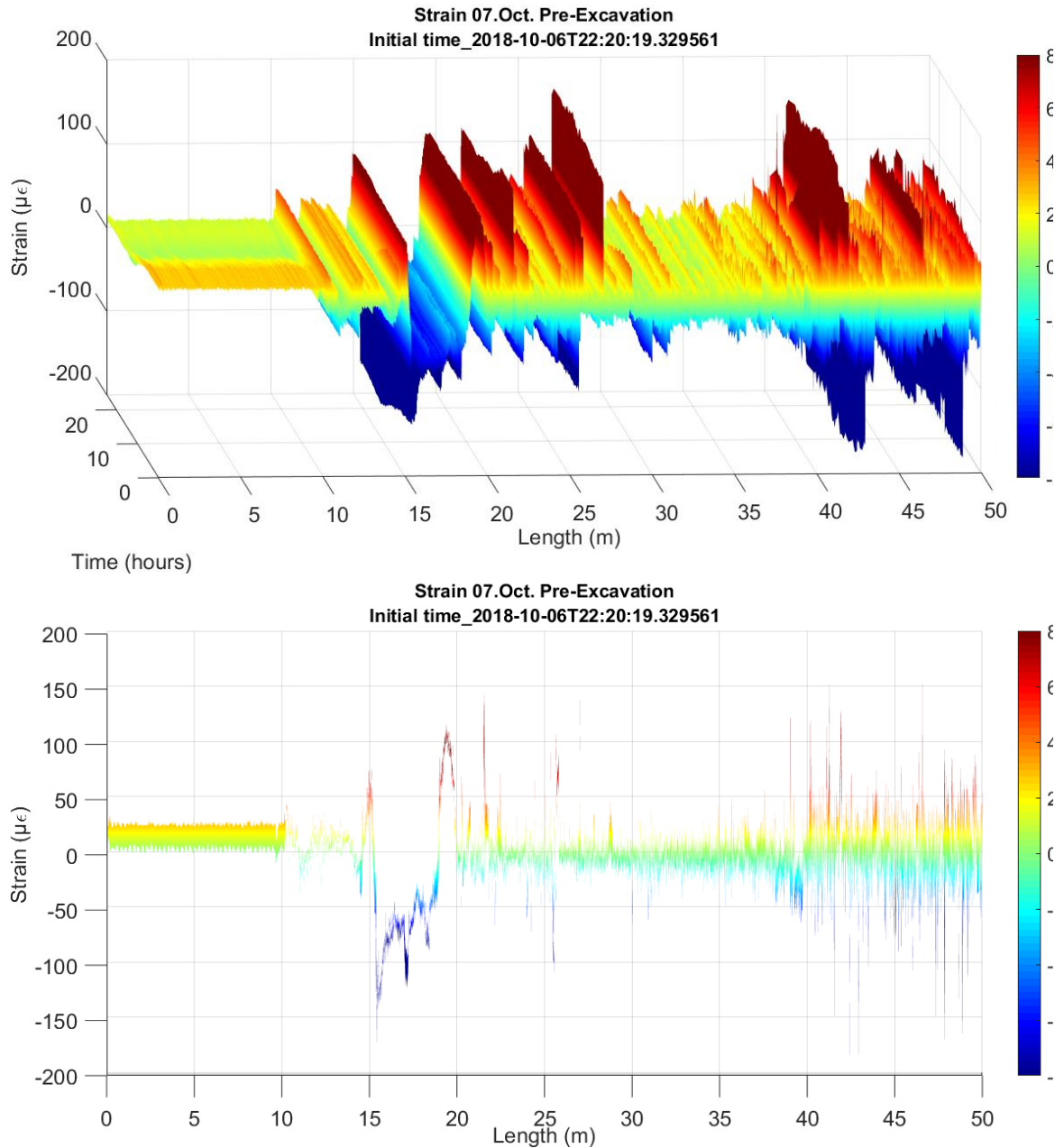


Figura 14. Pre-excavación. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

## EXCAVACIÓN

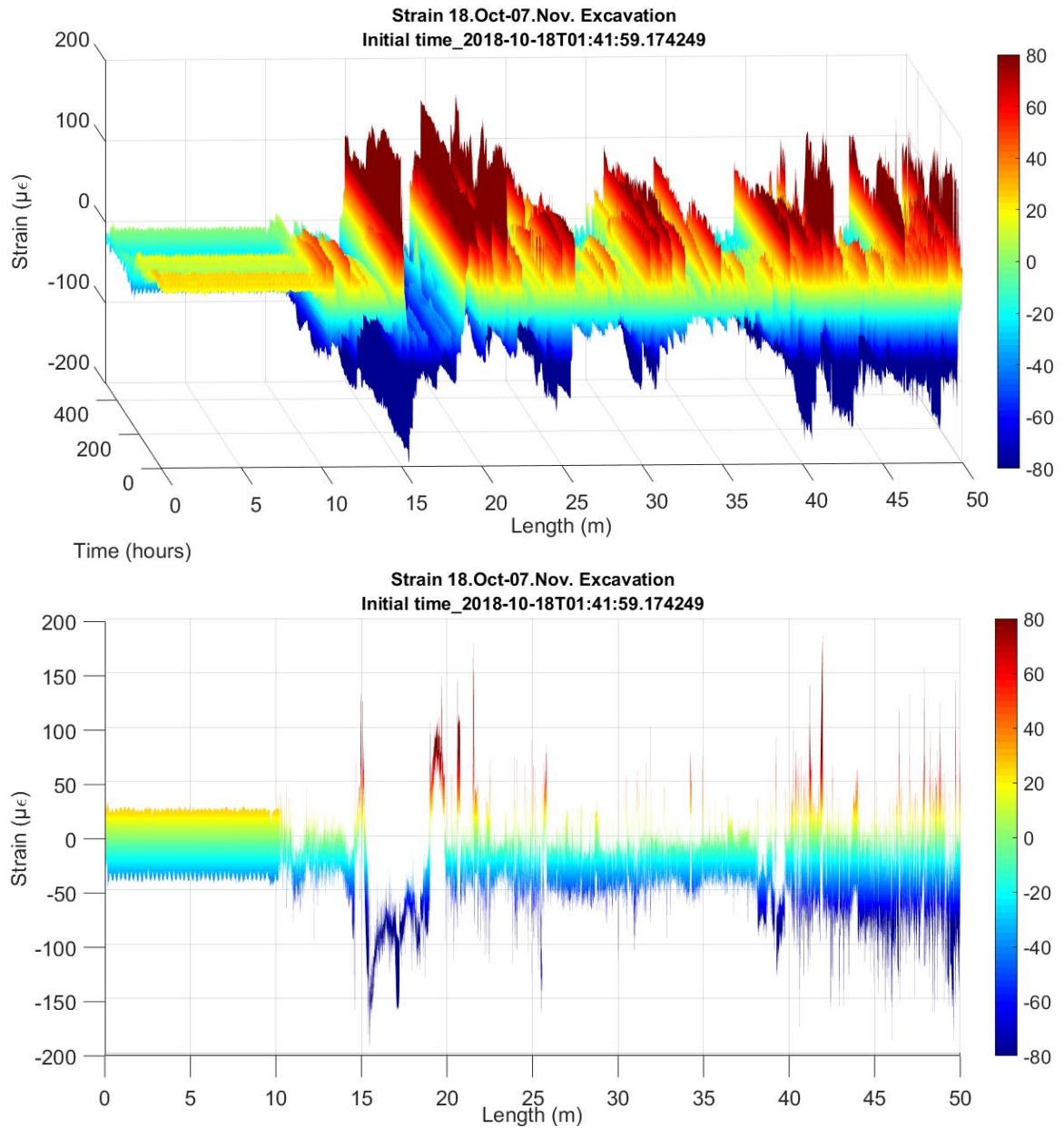


Figura 15. Excavación completa. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

**EXECUCIÓN IER TRAMO CIMENTACIÓN**

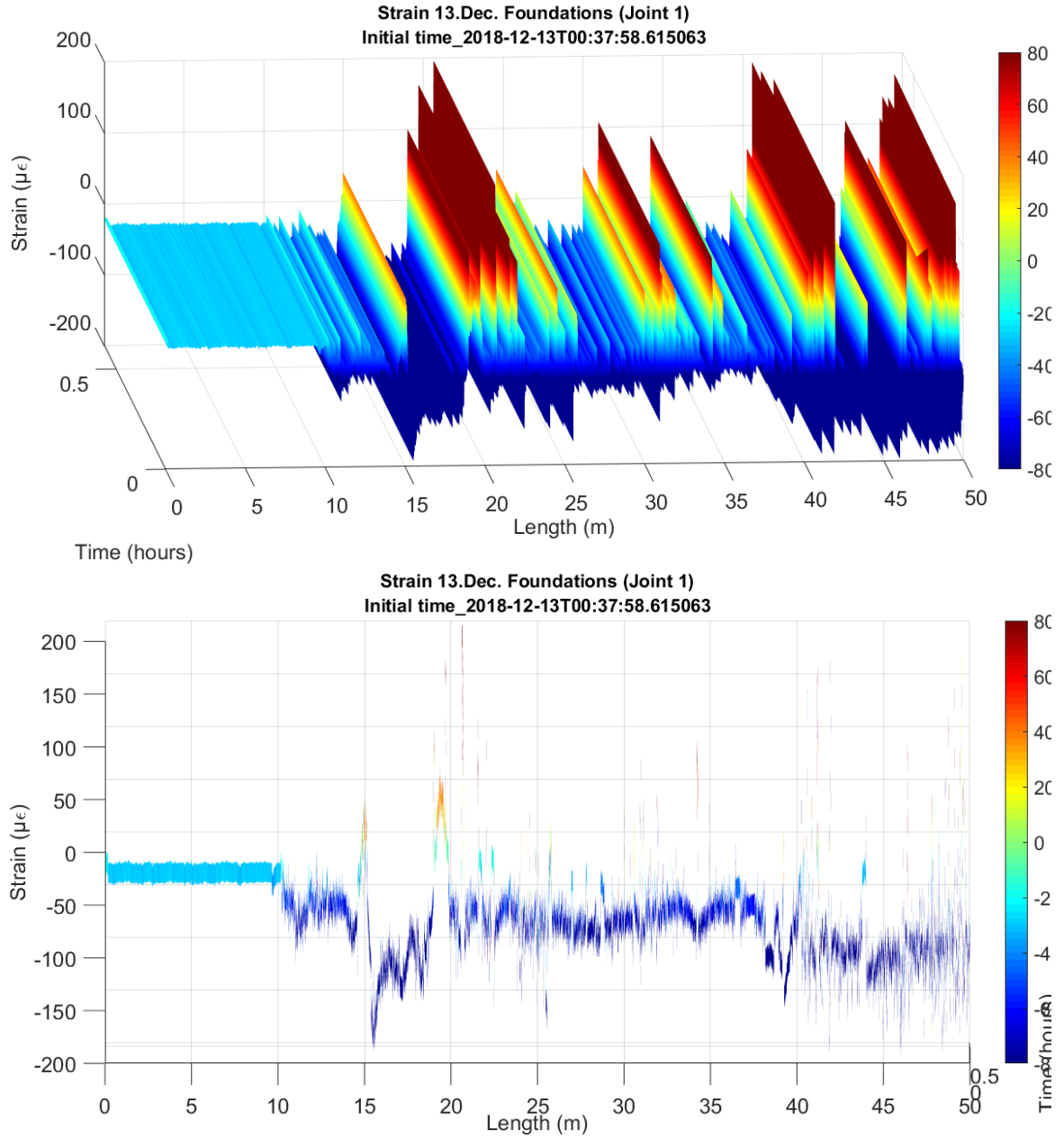


Figura 16. Ejecución primer tramo de losa de cimentación. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

**EVOLUCIÓN TOTAL**

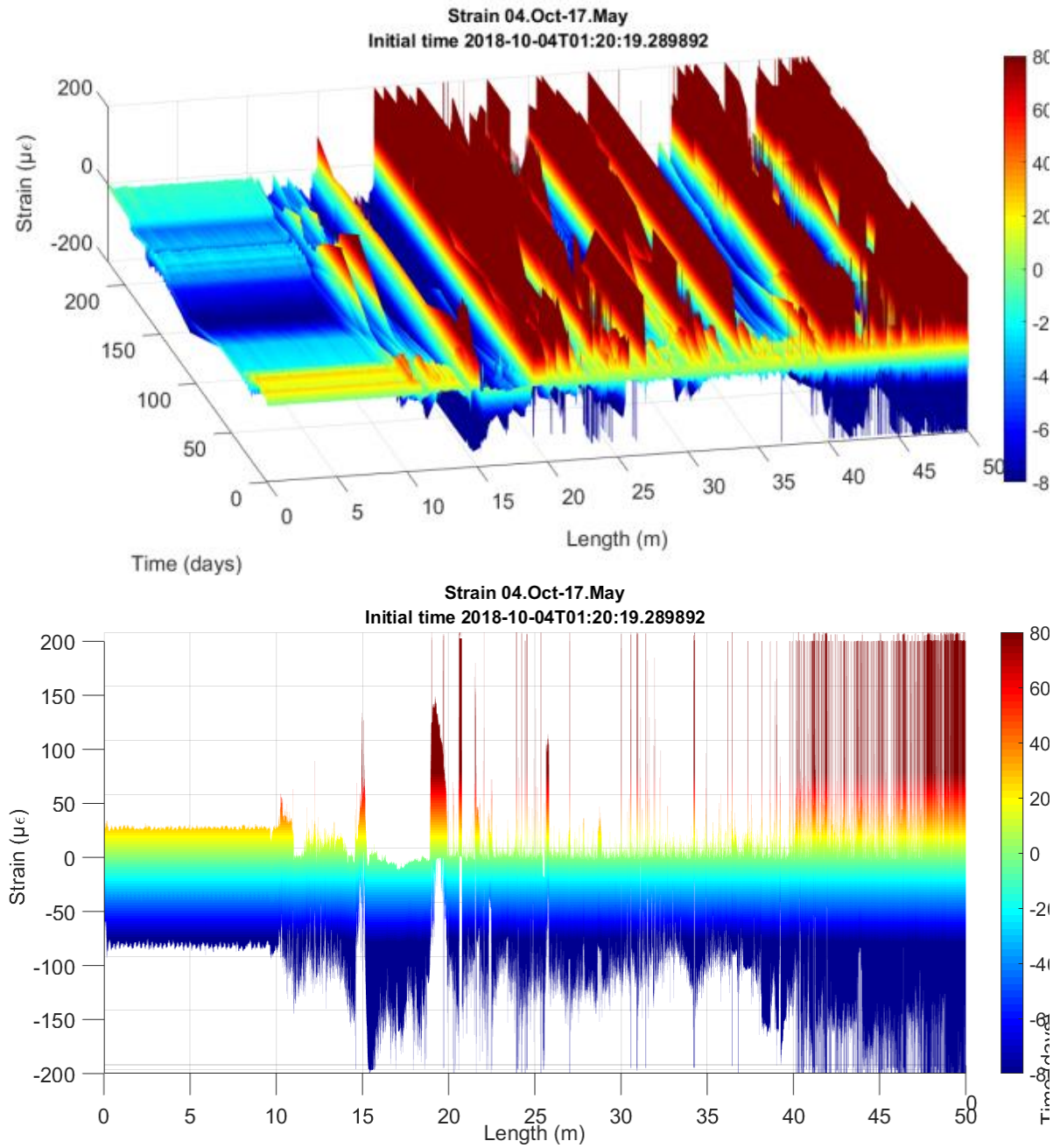


Figura 17. Evolución temporal de 4 de octubre y el 17 mayo. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

A continuación, en las Figura 18 y Figura 19, se incorpora el registro de lecturas en 6 puntos críticos a lo largo de la sección de la bóveda del túnel.

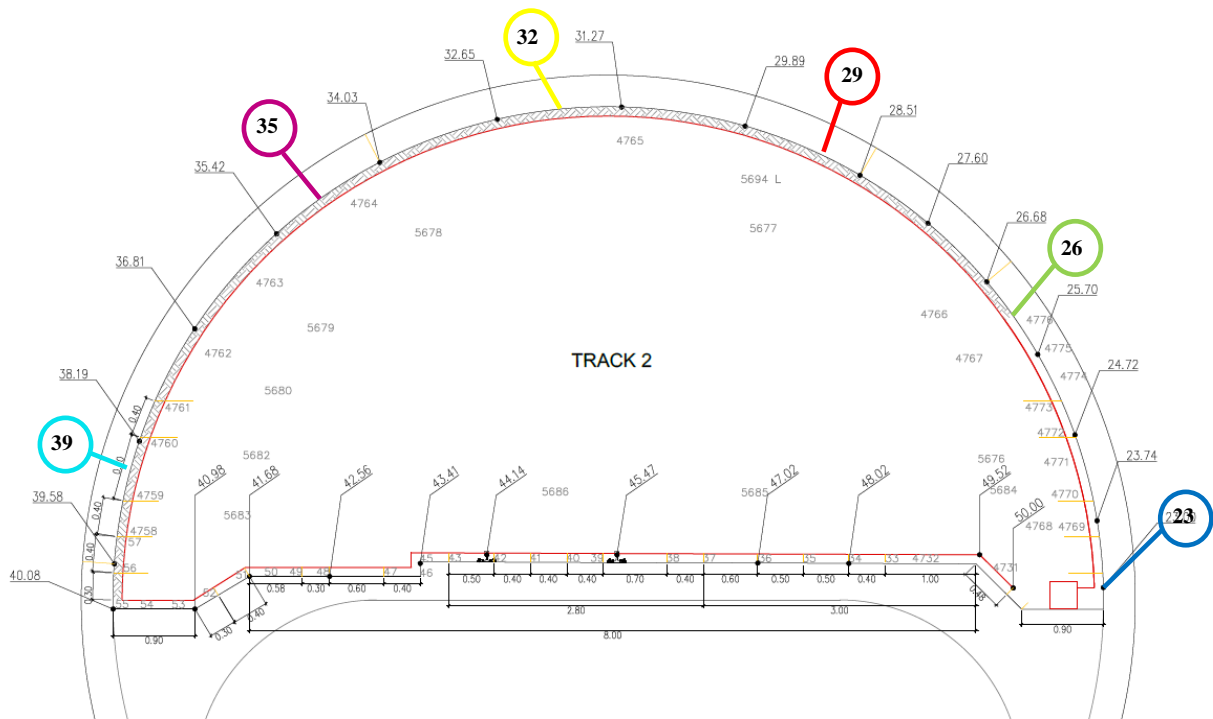


Figura 18. Identificación de puntos críticos de control en la bóveda del Túnel.

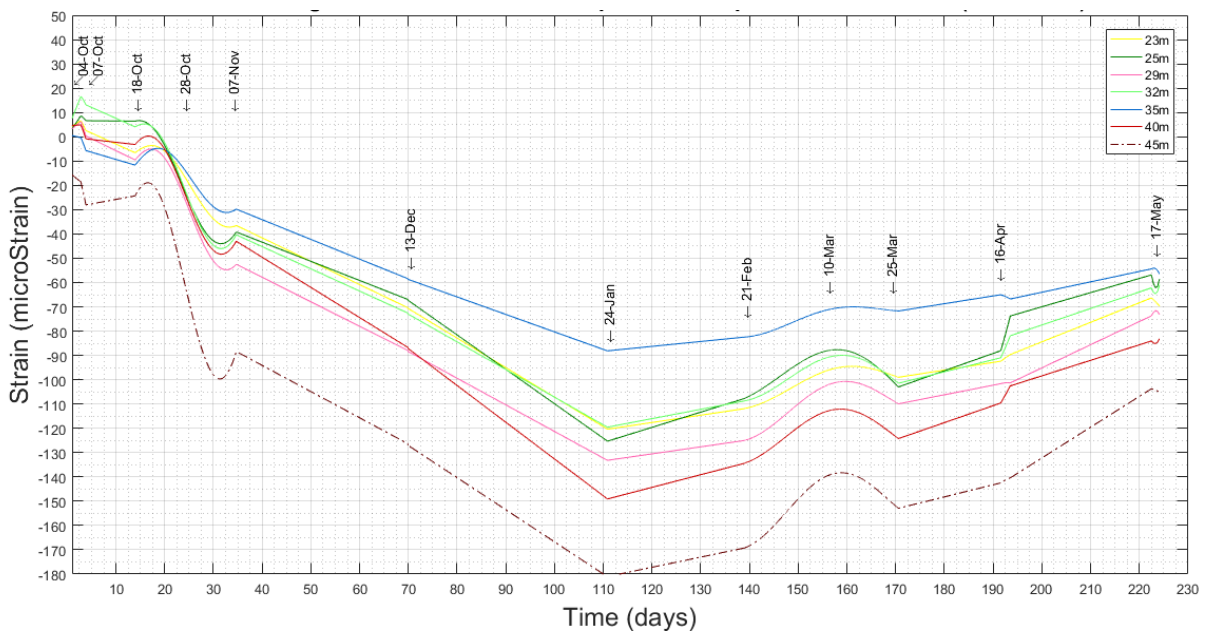


Figura 19. Evolución temporal del 4 de octubre de 2018 al 17 de mayo de 2019 en puntos críticos de control.

De forma general se observa que:

- 1) El tramo de fibra comprendida entre 40 y 50m → corresponde a la zona de vías. En este tramo es donde hay más excitación de la fibra dado el paso ferroviario. La vibración originada por el paso ferroviario produce que en este tramo haya más distorsión de lecturas. Aún y así, se observa como estas variaciones de microdeformaciones registradas tienen una tendencia de incremento a compresión, lo cual es coherente respecto a la descompresión y ovalización que sufre la sección curva del túnel y que genera que la losa haga una función de puntal ante esta acción. La ovalización del túnel se explica en el siguiente punto. Asimismo, en ningún caso los valores obtenidos superan la linde de aviso establecida en el Plan de Auscultación y Contingencias.
- 2) El tramo de fibra comprendida entre 23 y 40m → corresponde a la zona de la bóveda. En este tramo se observa cómo, de forma general, ha habido un incremento de microdeformaciones de compresión a lo largo de la instrumentación. Éste es debido a la descompresión originada por la excavación y vaciado de tierras de la obra, de forma que esta descompresión produce una cierta “ovalización” de la sección, que se traduce en un incremento de compresión en la fibra interior de la sección (la fibra interior de la sección se comprime y la fibra exterior de la sección se descomprime). Se puede observar claramente como se pasa de un color verde (deformación nula e inicial) a un color azul que indica compresión. Asimismo, en ningún caso los valores obtenidos superan la linde de aviso establecida en el Plan de Auscultación y Contingencias. Respecto al análisis de tensiones y a partir de la definición del módulo de deformación longitudinal secante  $E_c$  de hormigón y para un estado de tensiones en condiciones de servicio, es decir, para un estado o estadio elástico donde las tensiones de las fibras del hormigón de la sección son proporcionales a las deformaciones, se desprende que, aun observando este incremento de  $\mu\epsilon$ , estas no inducen unas tensiones excesivas en la misma.
- 3) El tramo de fibra comprendida entre 10 y 23m → corresponde al tramo de monitorización longitudinal. En esta zona se observan valores a compresión y a tracción, pero que a lo largo de su evolución han estado en todo momento constantes, es decir, sin variación respecto el origen de las lecturas y de calibrado. Este hecho indica que en este tramo no ha habido variaciones en respuesta de la estructura, es decir, que las actuaciones realizadas no han originado cambios de respuesta apreciables en la estructura.
- 4) El tramo de fibra comprendida entre 0 y 10m → corresponde al tramo de fibra sin adherir. En esta zona se observa una evolución lineal sin cambios diferenciales, donde se constata que no hay variaciones substanciales de temperatura que induzcan variaciones tensionales importantes, de forma que no influyen en el resto de zonas de FOD adherida.

Asimismo, se pueden apreciar picos y/o discontinuidades obtenidas de la monitorización, los cuales corresponden a las zonas de junta entre tramos de las dovelas donde la fibra óptica sufre una desadherencia con el hormigón, ya desde su implantación en origen. Estos picos permanecen estables en lo que respecta a su ubicación.

#### 4. CONCLUSIONES

El uso de sensores de fibra óptica (Optical Backscatter Reflectometer) es una tecnología prometedora para la monitorización del estado estructural, ya que permite la posibilidad de un monitoreo continuo en el tiempo y el espacio de la tensión y la temperatura a lo largo de la fibra. Se está realizando la monitorización de un tramo de túnel, que ha supuesto, hasta la fecha, un control de la estructura en servicio durante los ocho meses (octubre 2018 – mayo 2019) que abarcan las obras de construcción de la estructura de un edificio sobre la vía, hasta el nivel de planta 1ª, en la zona de edificio sobre el túnel.

La monitorización ha servido para identificar y caracterizar técnicamente los incrementos de

tensiones de tracción y compresión, como consecuencia de las distintas fases de la obra, desde antes de comenzar, con las lecturas de calibración previas hasta la fase de construcción de la estructura, en que nos encontramos. La monitorización continuará hasta el final de la obra, prevista en noviembre de 2020.

Durante este periodo de 8 meses, las variaciones de microdeformación de la fibra FOD 1 han sido de  $153\mu\epsilon$  que traducidas a tensiones suponen una variación de tensión máxima de 5,75MPa.

Estos valores son aceptables para este tipo de estructuras, por tratarse de valores de compresión en el hormigón. Por otra parte, en estos valores están incluidos los efectos térmicos.

A partir de las variaciones obtenidas en la monitorización de la fibra FOD 1 a lo largo de este medio ciclo térmico, se puede considerar que la repercusión de la acción térmica en el túnel ha sido despreciable

Una vez confirmado que túnel se encuentra en unas condiciones de seguridad adecuada y una vez acabada la obra, se dispondrá de un registro permanente para acceder a la sección, y poder realizar lecturas intermitentes a lo largo de su vida útil para conocer el comportamiento diferido. Esto se ha planteado dentro del preceptivo plan de mantenimiento del túnel.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los técnicos del IMHAB (Institut Municipal del Habitatge i Rehabilitació de Barcelona) y TMB (Transports de Barcelona, S.A.) las facilidades dadas para la gestión de todas las operaciones.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

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 7<sup>th</sup> 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.

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

W. P. A. Silva<sup>1\*</sup> , A. C. Lordsleem Júnior<sup>1</sup> , R. D. B. Ruiz<sup>1</sup> , J. H. A. Rocha<sup>2</sup> 

\*Autor de Contacto: [wpas@poli.br](mailto:wpas@poli.br)

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

Recepción: 14/11/2019 | Aceptación: 30/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

### 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.

**Citar como:** Silva, W. P. A., Lordsleem Júnior, A. C., Ruiz, R. D. B., Rocha, J. H. A. (2021), "Inspección de manifestaciones patológicas en edificios con cámara térmica integrada en Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT): una investigación documental", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 123 – 139, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

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

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor W. P. A. Silva contribuyó a la revisión bibliográfica, recolección de datos y redacción del trabajo, el autor A. C. Lordsleem Júnior contribuyó a la orientación y coordinación de la investigación, siendo responsable de la idea original. El autor R. D. B. Ruiz colaboró en los procesos de investigación y marco teórico. A su vez, el autor J. H. A. Rocha jugó un papel decisivo en la recopilación de datos, la revisión de la redacción y la discusión de los resultados.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2021.



## **Inspection of pathological manifestations in buildings using thermal imaging camera integrated into Unmanned Aerial Vehicle (UAV): a documental research**

### **ABSTRACT**

This paper aims to present the use of the UAV integrated thermographic camera in buildings inspection processes. The development of this study was based on a systematic review of articles and technical documents, scoping out the features and basic operations of thermographic cameras, the use of UAVs and the factors that influence the detection of pathological manifestations. The results allowed to identify the advantages and limitations of camera and UAV integration, demonstrating their feasibility and effectiveness when employed together. As a contribution, this study developed a flight protocol regarding the steps and procedures necessities to perform an inspection using the thermal camera integrated with the UAV.

**Keywords:** UAV; thermal camera; building inspection.

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

### **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.

**Palabras clave:** VANT; câmera térmica; inspeção predial.

### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las manifestaciones patológicas están presentes en la mayoría de las edificaciones, sea con mayor o menor intensidad, variando el período de aparición siendo necesario el diagnóstico y reparación, o entonces de manera compleja, exigiendo un análisis individualizado (Ferreira y Lobão, 2018). No obstante, aun cuando interfieran directamente en la vida útil y en el desempeño de la edificación, generando incomodidad y riesgo, tanto para las personas que lo usan directamente el desarrollo como para los transeúntes de su entorno, el análisis y tratamiento de las manifestaciones patológicas no es una prioridad (Bauer et al., 2011; Viégas, 2015). En diversas ocasiones la estructura no recibe la atención que necesita en relación con el proyecto, ejecución y mantenimiento, hecho que aumenta la susceptibilidad del desarrollo y la gravedad de las manifestaciones patológicas (Silva, 2007).

En vista de eso, es imprescindible el proceso de investigación y monitoreo de la estructura, ya que tales procedimientos permiten el acompañamiento del comportamiento de esta a lo largo del uso del desarrollo, recogiendo informaciones que, al ser enviadas para los modelos de análisis y decisión, permiten acompañar y detectar fallas (Agostinho, 2012). En ese sentido, los ensayos destructivos aplicados en materiales, componentes o sistemas constructivos se vuelven indeseables cuando se trata de diagnóstico de problemas en el contexto de las edificaciones en uso (Freitas et al., 2014). Con efecto en el desarrollo de técnicas no destructivas, que divisen el diagnóstico de deterioros en las construcciones, de forma general, vienen siendo objeto de estudio de muchas investigaciones. A partir de allí, el uso de la termografía infrarroja y de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en los procesos de inspección de edificios viene siendo explorado y difundido en la sociedad (Nascimento, 2014; Ellenberg et al., 2016; Entrop y Vasenev, 2017).

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva de imágenes de sensor remoto utilizado para detectar fallas en equipos eléctricos, tanto como alteraciones en diferentes partes de la edificación, como en el techo, los sistemas estructurales, los sistemas de cerramientos y los revestimientos. Una de esas alteraciones se refiere a la detección de excesos de humedad y temperatura, responsables por daños en materiales, con consecuencias en la salud de los usuarios (Cortizo, 2007; Lerma et al., 2011; Freitas et al., 2014). Sin embargo, aun cuando la técnica de la termografía infrarroja sea ampliamente difundida en los países europeos, gracias al acervo histórico, en Brasil su uso es relativamente incipiente, sea por el costo de los equipos de análisis, o por la dificultad de aplicación práctica (Cortizo et al., 2008).

En paralelo, el uso de VANT ha sido objeto de estudios en lo referente a la inspección de edificaciones para verificar las condiciones de desempeño y determinar medidas preventivas y correctivas que se hacen necesarias, en virtud de la inherente complejidad (altura, tamaño, dificultad de acceso y condiciones de exposición) (Witczuk et al., 2017). El VANT puede reducir el tiempo de estas operaciones de monitoreo, bien sea como un auxiliar de otros procesos de inspección que colocan en riesgo la vida humana (Álvarez et al., 2016). En este contexto, el presente artículo trata de la aplicación de la cámara infrarroja integrada a los vehículos aéreos no tripulados (VANT) como herramienta de inspección y monitoreo de edificios, explicando acerca de los factores del proceso (factores que influyen en la obtención de termogramas precisos para la identificación de manifestaciones patológicas), además de las ventajas y limitaciones de esa tecnología.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja constituye una herramienta predictiva usada en el diagnóstico precoz de fallas y otros problemas (estudio de análisis de desempeño, a fin de predecir y señalar eventuales anomalías, coadyuvando en el mantenimiento preventivo). Los resultados son presentados instantáneamente, durante la inspección, en la forma de imágenes térmicas o termogramas, que representan la distribución de la temperatura superficial del objeto observado y como tal, registrados para fines de las subsecuentes acciones, por parte de los interesados y posterior archivo (ITC, 2014).

Los sistemas de termografía infrarroja captan la radiación térmica, representada en el espectro eletromagnético, por el hecho de que todos los cuerpos están a una temperatura superior a cero absoluto emitiendo radiación, y convirtiéndola en un termograma el cual posee una escala policromática (colores) o monocromático (gris). El fenómeno de la radiación infrarroja (IR) fue descubierto por William Herschel en 1800 y en 1821, hubo el descubrimiento del efecto termoelectrico por Thomas Johann Seebeck, que es la conversión directa de la diferencia de temperatura en tensión eléctrica y vice-versa, siendo ese efecto la base para el funcionamiento de cámaras térmicas (Mistry, 2009; Viégas, 2015). La radiación térmica emitida por un objeto es captada por la cámara térmica viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann (1).

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

Donde E es la radiación emitida por el objeto (W/m<sup>2</sup>), q es el grado de emisión de energía (W), A es el área de la superficie emisora (m<sup>2</sup>), T es la temperatura absoluta (K),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann de valor  $5.676 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ , y  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie emisora, cuyo valor está entre 0 y 1, e indica cuanto la superficie se aproxima del comportamiento de un cuerpo negro, que sería una superficie ideal donde el índice de radiación sería máxima, luego  $\varepsilon=1$ . (Çengel y Ghayar, 2012).

Además, esa técnica puede ser clasificada como activa y pasiva, de acuerdo con el estímulo térmico utilizado. En la termografía activa, un estímulo externo es necesario para generar diferencias relevantes de temperatura. Diferentes técnicas pueden ser usadas para provocar un flujo de calor en el objeto de estudio, cada cual con características y limitaciones propias. La elección del tipo de estímulo térmico depende de las características del objeto de ensayo y del tipo de información a ser investigada (Batista, 2019).

En contraparte, para usar la termografía pasiva, donde ninguna estimulación artificial es utilizada, debe existir una diferencia natural de temperatura entre el objeto estudiado y el medio en el cual se encuentra, ya que frecuentemente está a una temperatura más elevada. El análisis por el método pasivo cuenta con las condiciones naturales de la estructura estudiada y de su entorno, siendo el calor solar un factor determinante (Cortizo, 2007). Por tanto, según lo demostrado en la Figura 1, las cámaras termográficas capturan la energía infrarroja emitida por los objetos y se convierten en una señal eléctrica y finalmente, en una imagen visible, en que cada nivel de energía es representado en una escala de colores (Meola y Carlomagno, 2004).

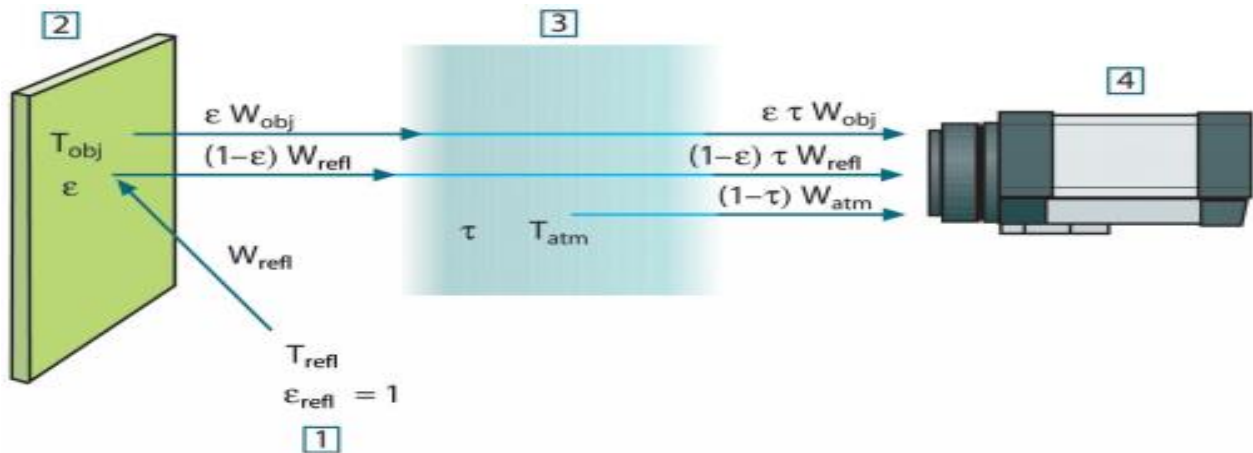


Figura 1. Representación esquemática de la situación de la medición termográfica general. 1) medio adyacente, 2) objeto, 3) atmósfera, 4) cámara.  $T_{obj}$ : temperatura del objeto,  $T_{refl}$ : temperatura reflejada,  $T_{atm}$ : temperatura de la atmósfera.  $W_{obj}$ : potencia de radiación emitida por el objeto,  $W_{refl}$ : potencia de la radiación emitida por el medio adyacente,  $W_{atm}$ : potencia de la radiación emitida por la atmósfera (Caldeira y Padaratz, 2015).

Así, esa técnica aplicada en edificios puede ser utilizada para evaluar la comodidad del revestimiento del piso (Barreira et al., 2013), detectar defectos de aislamiento, fugas de aire (Ocaña et al., 2004) problemas de humedad (daños en los tejados, contenido de humedad en las paredes), puentes térmicos (Asdrubali et al., 2012), para inspeccionar sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), detalles de construcción (Cerdeira et al., 2011; Barreira et al., 2013) y también en la inspección predial (Brique, 2016), según lo demostrado en la Figura 2.

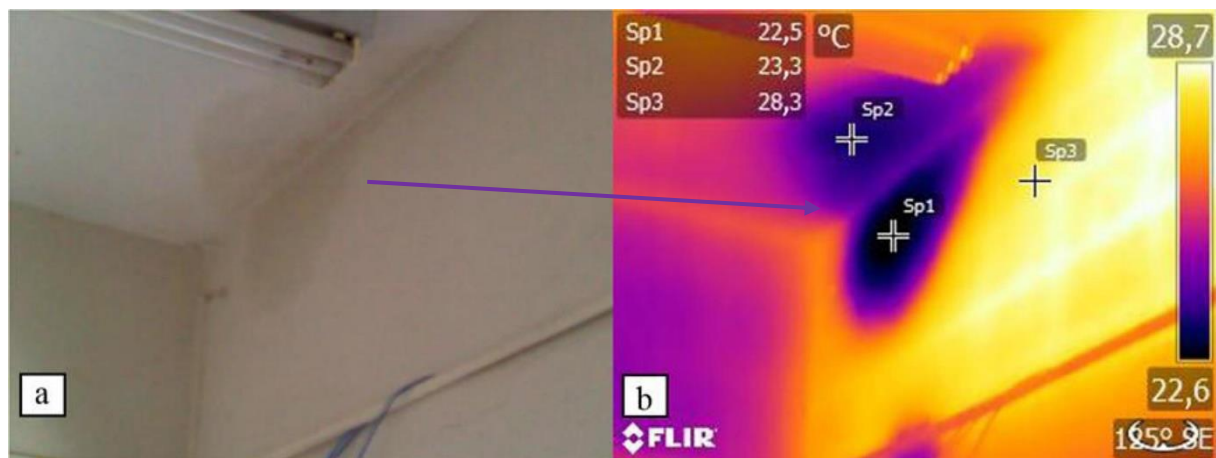


Figura 2. Penetración de agua de lluvia: (a) imagen digital y (b) termograma (Rocha et al., 2018).

En vista de las variables destacadas en la Tabla 1, cuanto mayor la resolución térmica (píxeles) de la cámara, es posible inspeccionar áreas mayores con mayor precisión. Así el uso de cámaras térmicas integradas al VANT, las mismas deben tener la mejor resolución posible. Además, el valor del IFOV (*Instantaneous Field of View*) y el ángulo de apertura del lente es una de las principales limitantes en los estudios envolviendo el análisis de edificios. Cuanto mayor sean estos parámetros, menor será la resolución de los termogramas y la precisión del estudio. (Andrade et al., 2019). Además de eso es necesario destacar que la inspección es limitada apenas a una aplicación pasiva de la termografía infrarroja, lo que significaría que la inspección de la estructura no sería, posible todos los días o sería restringida a horarios determinados localmente.

Tabla 1. Principales variables relacionadas a la cámara termográfica (Andrade et al., 2019)

RESOLUCIÓN DE LA CÁMARA PIXELS	IFOV ( <i>Instantaneous Field of View</i> )	ÁNGULO DE ABERTURA DEL LENTE
60 x 60, 120 x 120, 240 x 380, 320 x 240, 640 x 480.	El valor varía entre 0,6 y 3,7 mrad, usando el lente del equipo.	Las lentes más comunes son las de 15 y 25 grados, todavía puede variar entre 7 y 80 grados.

## 2.2 VANTs

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs) son según la ANAC (Agencia Nacional de Aviación Civil, 2017) cualquier aeronave no tripulada que puede ser remotamente pilotada, o automatizada. Esas aeronaves son pilotadas remotamente o de forma automática a través del uso de coordenadas pre-definidas. Se trata de una tecnología en ascenso que cada día tiene su uso diseminado en varias áreas (Nascimento, 2014). Los primeros desarrollos para VANT comenzaron en la década de 50 y se destinaban exclusivamente para fines militares. Diferentes proyectos fueron iniciados en diversos países con el objetivo de producir vehículos capaces de transportar misiones sin piloto a bordo de modo de evitar aún más pérdidas (Agostinho, 2012). Con el pasar del tiempo la tecnología pasó a ser difundida, y se usó por primera vez para fines no militares en 1986, para monitorear incendios forestales en Montana, Estados Unidos (Agostinho, 2012). En ese sentido el crecimiento en el uso de VANT se da por su bajo costo, agilidad de recolección y de procesamiento, facilidad de maniobra de las aeronaves, y el eficiente sistema de captura de imagen (Seibert y Teizer, 2014). Además de eso, los VANT son herramientas eficaces para la realización de procedimientos de sensor remoto, siendo el principal argumento para su uso la capacidad de alcanzar locales de difícil acceso, aliado a la gama de sensores aplicables que pueden ser incorporados al mismo, como cámara infrarroja, detección de luz y sensores de distancia (LIDAR, en inglés *Light Detection And Ranging*) (Freimuth y König, 2018).

En vista de eso, actualmente en el mercado existen dos tipos de VANTs, donde la diferencia básica se refiere al sistema aerodinámico, siendo de ala rotativa o fija. El primero se asemeja a un helicóptero o multirrotor, son aeronaves compactas de fácil operación y menor costo. En contraparte, los de ala fija presentan tamaños variados de acuerdo con la funcionalidad. (Jorge e Inamasu, 2014; Melo y Costa, 2015).

Tabla 2. Clasificación de los VANTs (Bento, 2008).

CATEGORÍA	ACRÓNIMO	ALCANCE [km]	ALTITUD VUELO [m]	AUTONOMÍA [h]	PESO [kg]
<i>Micro</i>	$\mu$ (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 Endurance</i>	MRE	>500	8000	10 – 18	1250
<i>Low Altitud Deep Penetration</i>	LADP	>250	50 – 9000	0,5 – 1	350
<i>Low Altitud Long Endurance</i>	LALE	>500	3000	>24	<30
<i>Medium Altitud Long Endurance</i>	MALE	>500	14000	24 – 48	1500

La Tabla 2 muestra que los UAV utilizados en el proceso de inspección de edificios en general tienen un peso inferior a 150 kg. El rango de vuelo, un factor dominante para el desarrollo del protocolo de vuelo y la eficiencia en el monitoreo de edificios, es inferior a dos horas.

### 2.3 La termografía integrada al VANT

Aun cuando la termografía y los VANTs son objeto de diferentes investigaciones recientes, y aún más incipiente el estudio integrado de ambos. Analizar los beneficios relacionados a esos dos tópicos motiva la combinación de sus funcionalidades para obtener beneficios mutuos (Entrop y Vasenev, 2017). La cámara térmica integrada al VANT es una importante herramienta para evaluar grandes áreas de forma automatizada y con reducida demanda de tiempo para la ejecución (Viana et al., 2018). Los principales desafíos de esa tecnología son la baja resolución de algunas cámaras termográficas, regulaciones que limitan las operaciones involucrando VANT la línea visual y la alta dependencia del clima (Witczuk et al., 2017).

Además de eso, los sensores de calor son una opción de carga útil para la generación de imágenes térmicas aéreas de alta resolución. Esta tecnología permite el levantamiento rápido y seguro de áreas térmicas, muchas veces presentes en terrenos inaccesibles o peligrosos (Harvey et al., 2016). Esas imágenes tomadas por el VANT tienen el potencial de convertirse en una herramienta fundamental en la ciencia geotérmica, incluyendo levantamientos geológicos, geoquímicos y geofísicos, línea de base para estudios y monitoreos ambientales, geotécnicos y obras civiles, destacando en el caso de esta investigación, la inspección de edificios. Tal tecnología puede ser utilizada para el mapeamiento de pérdida de calor, además de poder reunir informaciones térmicas, tales como fugas de calor, usando una cámara infrarroja y haciendo el procesamiento de la imagen obtenida. Aun cuando la realización de las inspecciones sea un proceso menos difícil para edificaciones de pequeña altura, tomar los datos térmicos con el aumento de la altura, notablemente en rascacielos y tejados es mucho más complejo, siendo un proceso peligroso (Kayan et al., 2018). La termografía aérea es una tecnología que ha sido utilizada en tiempos recientes para grabar imágenes térmicas sin la necesidad de acceso a los edificios, además de ser capaz de alcanzar un área de difícil acceso, como los tejados, mientras carga las cámaras infrarrojas y otros sensores (Chu et al., 2016).

Por lo tanto, la combinación de la termografía por infrarrojo con los VANTs permite que las tareas de mantenimiento sean optimizadas (Muñoz et al., 2017) y, en consecuencia, trae ventajas económicas significativas (Ramírez et al., 2018). Tales aspectos se deben al hecho que los VANTs pueden ser equipados con cámaras de alta resolución permitiendo a los usuarios obtener datos en tiempo real. Además, las imágenes aéreas que antes eran capturadas de un avión liviano o un helicóptero, y el costo del combustible, son desventajas que hace de los VANTs más viables, una vez que la fuente de energía para el vuelo puede ser fácilmente recargada (Lavars, 2015). Así, siendo equipado con una cámara termográfica de alta resolución, el VANT se vuelve una excelente herramienta para tomar informaciones térmicas de edificios (Zhang et al., 2015). En ese sentido, la Figura 3, demuestra un modelo de VANT que ya viene integrado con la cámara digital en paralelo con la cámara termográfica, diferente de otros modelos el que es necesario remover la primera para posteriormente instalar la segunda.



Figura 3. VANT con cámara termográfica acoplada a la cámara digital. (Topdrone, 2020).

### 3. INSPECCIÓN DE EDIFICIOS

La aplicación de la termografía en el proceso de inspección está basada en la existencia de anomalías o defectos que influyen en las propiedades térmicas de la estructura, en la Figura 4, los defectos interrumpen la transferencia de calor del concreto, visto que los vacíos existentes son rellenados con aire o agua, y debido la diferencia de conductibilidad térmica de los materiales, y verificada la variación de la temperatura a lo largo de la estructura (Rocha y Póvoas, 2017).

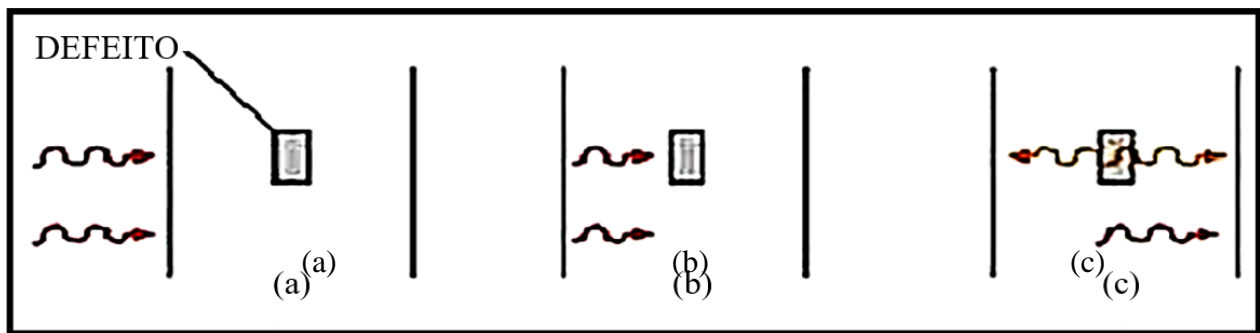


Figura 4. Propagación idealizada de un único pulso de calor en un material: (a) Un impulso de energía aplicado a la superficie; (b) El pulso de calor viaja dentro del material y encuentra un defecto; (c) El defecto refleja parcialmente y transmite parcialmente el pulso (Cortizo, 2007).

Además, la termografía infrarroja produce una imagen térmica, en que cada color representa un nivel de temperatura superficial de los objetos. Por medio del análisis de la imagen obtenida por el equipo, es posible identificar la existencia de focos de humedad, anomalías, elementos ocultos, entre otros (Grinzato et al., 2011). En consecuencia, con la termografía infrarroja es posible detectar solamente anomalías asociadas a las modificaciones mensurables de las características térmicas como flujo de calor y temperaturas resultantes, manifestaciones patológicas con profundidades limitadas, es decir cercanas a la superficie (Bauer y Pavón, 2015). Así en la construcción civil, una variación de temperatura de 1°C hasta 2°C es generalmente indicativo o una sospecha de existencia de problemas. A partir de 4°C se afirma la existencia de la anomalía en el cuerpo (Maldague y Marinetti, 1996; Cortizo et al., 2008).

Por tanto, con esa tecnología es posible identificar fallas de adherencia o ausencia de mortero (Bauer et al., 2015), presencia de humedad confinada en revestimientos cerámicos (Edis et al., 2014; Bauer y Pavón, 2015), además de la existencia de fisuras, problemas de desprendimiento, y filtraciones, por el gradiente térmico verificado en el termograma. (Freitas et al., 2014; Viégas, 2015; Rocha y Póvoas, 2017; Takeda y Mazer, 2018; Batista, 2019).

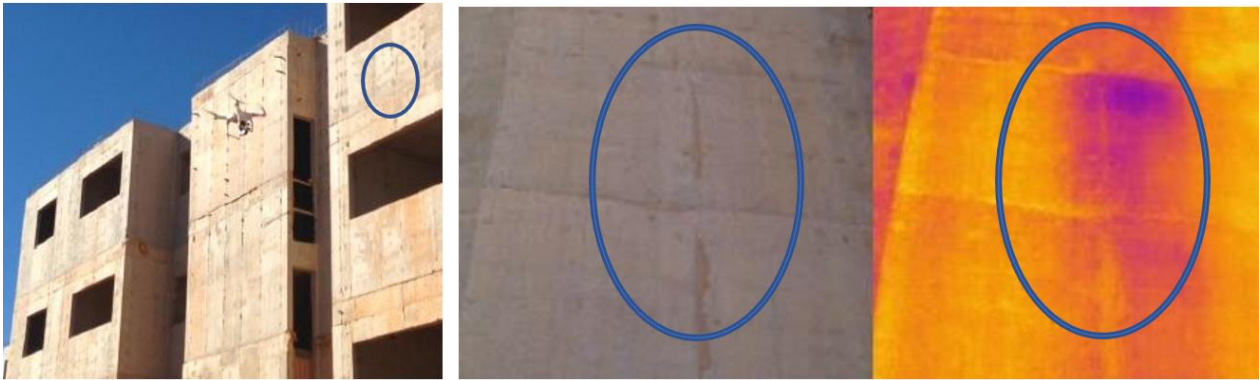


Figura 5. Inspección con VANT integrado con cámara térmica (Nascimento, 2014)

En el caso de la Figura 5, de acuerdo con Nascimento (2014), las imágenes fueron obtenidas al inicio de la mañana siendo posible el reconocimiento de regiones con fisuras y filtraciones, ya que el clima estaba ameno y permitió una mayor diferencia en el gradiente de temperatura, siendo las regiones más claras las que presentan mayor temperatura que aquellas que están representadas por tonos más oscuros.

### 3.1 Ventajas y limitaciones

En la Tabla 3 son presentadas las principales ventajas y limitaciones del uso de la cámara termográfica integrada al VANT de acuerdo con la literatura (Yehia et al., 2007; Agostinho, 2012; Sham et al., 2012; Jorge y Inamasu, 2014; Mavromatidis et al., 2014; Seibert y Teizer, 2014; Domingues, 2015; Melo y 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 y Vasenev, 2017; Muñoz et al., 2017; Witczuk et al., 2017; Freimuth y König, 2018); Ramírez et al., 2018; Andrade et al., 2019).

Tabla 3. Ventajas y limitaciones del uso da cámara termográfica integrada al VANT.

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de alcanzar áreas de difícil acceso;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener datos en tiempo real;</li> <li>• Reducir riesgos operacionales;</li> </ul> </li> <li>• Aumentar la seguridad del operador y los colaboradores involucrados;</li> <li>• Reducción del tiempo de inspección, generando economía y agilizando la planificación de la recuperación de la estructura;</li> <li>• Mayor confiabilidad comparada con métodos convencionales;</li> <li>• Tecnología rápida, no-invasiva, no destructiva y sin contacto;</li> <li>• Puede ser aplicada a una distancia considerable para analizar e inspeccionar grandes áreas en pequeños intervalos de tiempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomía de vuelo entre 30 min a 2 h, en modelos con menos de 150 kg;</li> <li>• Condiciones climáticas favorables, implicando tanto en el vuelo como en la emisión calórica de la superficie;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujeto a las regulaciones y restricciones locales para la realización del vuelo, no siendo posible ser realizado en cualquier localidad;</li> </ul> </li> <li>• Interferencia en los resultados debido a reflejos en caso de que sea utilizado en un predio que tenga edificios vecinos con fachadas de espejos;</li> <li>• Alteraciones en lecturas obtenidas a distancias superiores a 10 metros entre la cámara y el objeto estudiado;</li> <li>• No es posible medir el espesor y la profundidad de la manifestación patológica.</li> </ul>



Por medio de la Tabla 3 es posible constatar que las principales ventajas del uso de esa tecnología están conectadas al hecho de la optimización de los procedimientos de inspección, obteniendo datos en tiempo real y en menor intervalo de tiempo. En contrapartida, sus limitaciones están relacionadas a los requisitos necesarios para la obtención de un termograma preciso, destacando las condiciones climáticas favorables y lecturas efectuadas a partir de ángulos y distancias que no interfieran en los resultados.

Finalmente, uno de los factores preponderantes para el uso de la termografía aérea, está relacionado al costo de la operación y de los equipos, no obstante, realizando una comparación de los beneficios de esa herramienta, en relación a los métodos convencionales, se verifica sus potencialidades, observando la velocidad de obtención de los datos y la seguridad del responsable por la inspección (Mavromatidis et al., 2014; Ariwoola, 2016).

### 3.2 Factores del proceso referente a la lectura térmica

El análisis termográfico es un procedimiento en el cual el inspector opera el termovisor, apunta hacia el objeto de inspección y detecta el defecto a través del análisis del termograma obtenido. A pesar de la simplicidad aparente de la técnica, el análisis de los resultados puede ser complicado y hasta llevar a conclusiones erradas en caso de no tomar ciertas precauciones antes y durante la realización del ensayo (Brique, 2016). Luego que el propio operador debe tener conocimiento de la influencia de la radiación solar, del viento, la lluvia, y la forma como esos factores afectan la distribución térmica del objeto analizado en ambiente abierto (Batista, 2019).

En vista de eso, para garantizar la calidad de la imagen, la sensibilidad y el contraste térmico, es necesario estar atento a algunos factores como la emisión del material que es función de la temperatura superficial y del ángulo de observación, en el reflejo de la superficie, función de la radiación directa incidente y de la radiación por presencia de fuentes externas (sombras, reflejos), distancia y ángulo de medición. (Barreira, 2004; Cortizo, 2007; Bauer, 2015; Viégas, 2015; Batista, 2019). De otra manera, el calor irradiado por el sol puede afectar la medición termográfica, pues altera el flujo normal de calor del interior hacia el exterior. La distancia del equipo al objeto puede alterar la lectura de la temperatura superficial, pues disminuye la resolución de los termogramas e influye la atenuación atmosférica (Labat et al., 2011).

En relación con el horario de inspección, fue verificado que hay divergencias entre los autores, pero ese parámetro depende de las condiciones ambientales del local objeto de estudio (Rocha y Póvoas, 2017). En ese sentido, fue verificado un comportamiento distinto en relación a los períodos de medición (seco y lluvioso), así como los horarios 8h, 15h y 21h (Freitas et al., 2014). En otros casos, fueron realizadas mediciones en horarios distintos en el período de la mañana y la tarde (Nascimento, 2014), ya que la emisión de materiales no compuestos por metales disminuye con el aumento de la temperatura (Barreira, 2004). Hubo también casos en que se optó por verificar las mediciones durante todo el día (6-18h), a fin de evaluar los mejores horarios de medición, tanto en la mañana como en la tarde (Viégas, 2015).

Finalmente, algunos autores (Uemoto, 2000; Watase et al., 2015; Hiasa et al., 2016) recomiendan la inspección durante la noche para eliminar los efectos de la radiación solar, y tener una mejor visión entre el defecto y las regiones intactas, evitando falsas detecciones (Rocha y Póvoas, 2017). Además de eso, los gradientes térmicos y la turbulencia alteran el índice de refracción del aire provocando una reducción en la calidad de la imagen. En paralelo, la atmósfera presente entre la fuente emisora y el receptor puede originar perturbaciones en la medición. Luego, se debe mantener la distancia de 10 metros entre la fuente emisora y el receptor, corrigiendo las mediciones realizadas con distancias superiores (Barreira, 2004; Comitti, 2012; Viégas, 2015). Además, en los días con vientos sobre de 7m/s no se debe realizar mediciones con termografía infrarroja, ya que los datos obtenidos inducirán al error del análisis térmico del objeto (ITC, 2014).

De acuerdo con la norma NBR 15572 (ABNT, 2013), es necesario que el ángulo entre el termovisor

y el punto inspeccionado sea lo más perpendicular posible, para que no haya reducción en la emisión debido a los ángulos de observación inadecuados (mayores que 60°). Viégas (2015) afirma que no se debe permanecer directamente frente al objeto para que no haya reflexión del calor del termografista, para tanto es recomendado ubicarse con un ángulo aproximado de 5°, con relación a la horizontal del objeto a ser analizado térmicamente, según la Figura 6.

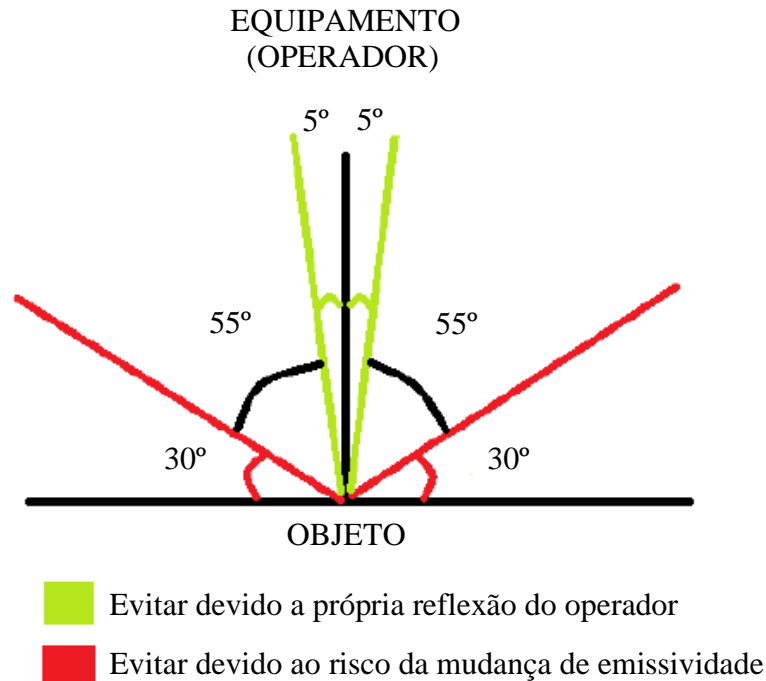


Figura 6. Ângulos de medição: cuidados (Viégas, 2015)

### 3.3 Protocolo de vuelo

La planificación y desarrollo del proyecto podrá variar según la capacidad de vuelo, siendo influenciando por la precisión y la trayectoria de estos (Agostinho, 2012). Todavía, se percibe que las herramientas de preparación de vuelos comercialmente disponibles, en algunos casos aún son insuficientes para realizar determinadas inspecciones, quedando al operador crear sus propias herramientas y sus propios protocolos (Seibert e Teizer, 2014). En consecuencia, de esto, el siguiente protocolo, Figura 7 y Tabla 4, fue desarrollada basado en el trabajo de diversos autores (Agostinho, 2012; Siebert y Teizer, 2014; Ariwoola, 2016; Ellenberg et al., 2016; Entrop y Vasenv, 2017; Freimuth y König, 2018).

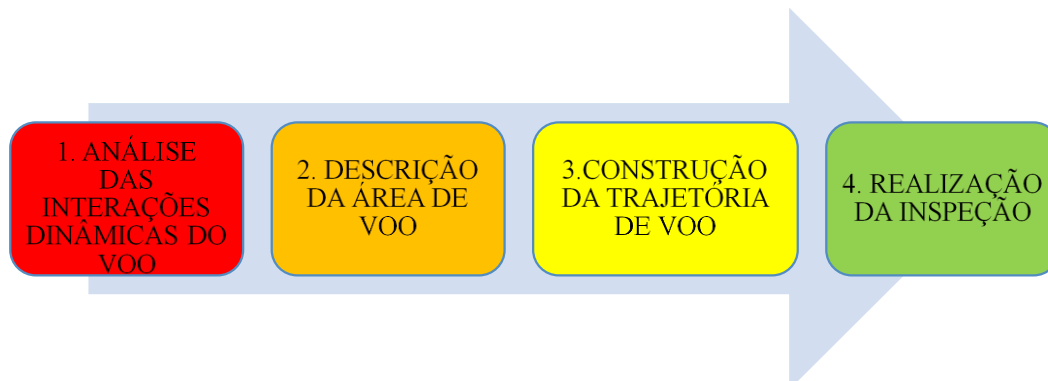


Figura 7. Etapas del protocolo de vuelo.

Tabla 4. Protocolo de Vuelo

ETAPAS	PROCEDIMIENTOS
1. Análisis de las interacciones dinámicas del vuelo	En esa etapa es necesario verificar la regulación sobre el uso de VANT en el local donde será hecha la inspección, además de un estudio sobre las condiciones climáticas de la fecha, y configuración del objeto a ser estudiado (área, cantidad de pavimentos, límite máximo), y así, proceder con la elección de los equipos.
2. Descripción del área de vuelo	En la segunda etapa es preciso realizar un vuelo test con el propósito de determinar las áreas de riesgo, además de establecer los ángulos y las distancias de lectura.
3. Construcción de la trayectoria de vuelo	Una vez determinada las áreas de riesgo, se debe construir una trayectoria de vuelo, de tal forma que sea posible realizar la misma con 75% de carga del VANT, garantizando la autonomía de vuelo.
4. Realización de la inspección	Finalizada las etapas anteriores, es posible iniciar la inspección, de tal forma que sea posible obtener los datos de lectura de forma segura y precisa.

Analizando la Tabla 4 se verifica que la etapa inicial está relacionada a los prerrequisitos para realizar los tales equipos en el local donde será efectuado el procedimiento, las condiciones climáticas, siendo necesario vientos inferiores a 7 m/s y no recomendada su realización los días nublados, tener conocimiento del objeto a ser estudiado, como dimensiones y localización, y a partir de allí realizar las elecciones de los equipos que garanticen una autonomía de vuelo para tal procedimiento. Posteriormente, se debe determinar el área que el VANT se estará desplazando a lo largo de la inspección, estando atento a las áreas de riesgos, tales como: flujo de personas, animales y obstáculos, y estableciendo los ángulos y las distancias en que las lecturas serán efectuadas, de tal forma que las distancias no sean superiores a 10 metros y que los ángulos obedezcan lo que fue discutido en 3.1, asegurando la precisión de los datos obtenidos. A partir de allí, se debe construir el camino que será recorrido por el VANT de tal forma que no haya desplazamiento en áreas de riesgos, y que el aparato tenga una autonomía de vuelo suficiente, siendo posible concluir la trayectoria con 75% de carga en la batería, visto la energía consumida en los procedimientos de aterrizaje y despegue. Finalmente, concluidas las etapas anteriores se puede realizar la inspección.

### 3.4 Análisis de datos de la literatura

Se verificó que a pesar de la simplicidad de utilizar el termovisor para obtener termogramas durante las inspecciones, si no se toman en consideración las interferencias y las condiciones ambientales en las cuales las imágenes fueron obtenidas, el análisis y la interpretación de los termogramas pueden llevar a conclusiones equivocadas (Takeda y Mazer, 2018). Además de eso, fue constatado que, cuanto mayor y más superficial el área del defecto, la detección será más fácil (Rocha y Póvoas, 2017). En ese sentido, fue constatado que se la relación  $R/d$  ( $R$ : dimensión corta del defecto y  $d$ : profundidad del defecto desde la superficie) sea mayor que 1, los defectos son encontrados; caso esta relación  $R/d$  sea igual a 0,45, son detectables hasta una profundidad de 10 centímetros (Farrag et al., 2016). Además, en los perfiles térmicos presentados en los termogramas de las paredes, había una nítida variación en la temperatura superficial. Tal diferencia térmica encontrada denota la presencia de diferentes materiales en el interior de la pared, debido a las propiedades físicas y químicas bastante distintas (Cortizo, 2007).

Además de eso, fue verificado en la inspección de una estructura con revestimiento cerámico que las mejores mediciones fueron obtenidas posterior al calentamiento de la fachada (técnica pasiva), e que el termograma en la tarde tuvo mejor nitidez comparado con el termograma de la mañana (Viégas, 2015). En un momento posterior, estudiando una edificación revestida con mortero, se

constató que los mejores horarios para medición son entre 11-12h y 17-18h, además de verificar una coloración amarilla “más vibrante” en la región con presencia de desprendimiento de revestimiento. Esto porque, en la referida región hay elevación de la temperatura con relación al restante de la fachada revestida con mortero sin presencia de manifestaciones patológicas. Finalmente, realizando el monitoreo de una estructura revestida con azulejos, los mejores horarios para la medición fueron entre 9-10h y 14-15h (Viégas, 2015). Corroborando así, lo que fue afirmado en 3.1, en lo que se refiere a los horarios de medición.

Se observó también una leve tendencia de haber mayores diferencias de temperatura (entre las regiones con y sin fisuras) en las áreas más calentadas, así como se verificó una mayor dispersión de esas variaciones medidas para las áreas más calientes (Freitas et al., 2014). Además, en un primer momento fue considerado que al menos una distancia de 5 metros, entre el VANT y los objetos de investigación era segura. Todavía en la realización de los ensayos, esa distancia fue aumentada para 10 metros, garantizando tanto la veracidad de los datos obtenidos, cuanto a seguridad de la aeronave (Entrop e Vasenev, 2017). De otra manera la realización de simulaciones y creación de modelos de vuelo proporcionan una inspección más precisa y un mejor rendimiento por parte del VANT, vista las características de velocidad y necesidad de recarga de la batería (Freimuth y König, 2018).

#### 4. CONCLUSIONES

Con base en lo que fue discutido y en los datos presentados, es posible afirmar que la termografía integrada al VANT se muestra como una herramienta capaz de identificar anomalías térmicas asociadas a las manifestaciones patológicas. Adicionalmente, se verifica que ese mecanismo optimiza los procesos de inspección predial, permitiendo la caracterización de áreas de difícil acceso, sin poner en riesgo la seguridad de los colaboradores, además de ofrecer datos con una mayor rapidez y precisión, que ayudarán en los ensayos de inspección y recuperación de las estructuras.

Sin embargo, quedó constatado que la misma aún presenta algunas limitaciones, siendo vulnerable la capacidad de carga del VANT, las oscilaciones climáticas que implican el vuelo y en los datos obtenidos en el termograma, además de los reflejos de los objetos cercanos a los que están siendo estudiados que pueden interferir en los resultados. En ese sentido, las principales contribuciones del trabajo consisten en un protocolo de vuelo específico para el uso de cámara termográfica integrada al VANT y una revisión bibliográfica sobre los principios y las técnicas involucradas en ese procedimiento, siendo una base para estudios e investigaciones de desarrollo y ampliación de los modelos de monitoreo, que, en paralelo con los avances tecnológicos, tienden a superar las desventajas y garantizar la eficacia de tal herramienta.

#### 5. REFERENCIAS

- 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](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 Termography – 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 façade*. 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](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>