

Plan de conservación preventiva para el edificio Vilanova Artigas

Investigación sobre el hormigón visto de las fachadas del edificio

CLAUDIA DE ANDRADE OLIVEIRA

Profesora asociada de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo. Coordinó la tarea n° 3 sobre la investigación del hormigón del Plan de Conservación Preventiva, preparado con el apoyo del programa Keeping It Modern [KIM] de la Fundación Getty (2015–2017). Actualmente coordina proyectos de investigación y desarrollo en las áreas de materiales, sistemas de construcción, análisis de desempeño y riesgo, mantenimiento y conservación de edificios. Correo electrónico: ctao@usp.br

PALABRAS CLAVE

HORMIGÓN VISTO; ARQUITECTURA MODERNA;
CARBONATACIÓN; CORROSIÓN DE LA ARMADURA;
ABSORCIÓN SUPERFICIAL DE AGUA

Resumen

Este texto analiza los problemas y retos de la conservación del hormigón visto de las fachadas del edificio Vilanova Artigas. Los trabajos referidos a estos componentes edilicios necesariamente implicaron relevar características ambientales, visuales y de textura, realizar ensayos in loco de profundidad de carbonatación y de absorción de agua y llevar a cabo inspecciones de armaduras. Los resultados de dichas acciones indican que el frente de carbonatación, de hasta 30 mm, ha alcanzado la profundidad del refuerzo y la corrosión atmosférica del acero es el mecanismo predominante de degradación, agravada tanto por los ciclos de humidificación y secado del hormigón como por la falta de mantenimiento durante casi cincuenta años. El espesor prevalente de recubrimiento de la armadura es 10 mm. Las irregularidades, la textura porosa del hormigón y la disposición de las armaduras son características del proyecto y del proceso constructivo de estas estructuras. Tres frentes de estudios son orientados hacia la conservación de las fachadas: armonización cromática y de la textura entre hormigón y materiales de reparación; protección y control de humedad de las superficies de hormigón (tratamientos no invasivos con hidrófugos conjugados con aditivos inhibidores de la corrosión); elaboración de un modelo analítico estructural para verificar estados de tensión y deformación frente al agravamiento de la corrosión.



FOTOGRAFÍA: LEONARDO FINOTTI

Introducción

Este texto aborda el análisis del estado de conservación de las fachadas del edificio Vilanova Artigas, que constituyó la Tarea n°3 del Plan de Conservación Preventiva, preparado con el apoyo del programa Keeping It Modern [KIM] de la Fundación Getty. Tal como se presenta en el artículo n° 1, la Tarea n°3 consistió en la investigación del hormigón armado visto de las fachadas y su estado actual de conservación con el fin de subvencionar los procedimientos de mantenimiento que deben aplicarse al edificio. En el texto se presentan algunos resultados del trabajo del equipo compuesto por Claudia Andrade Oliveira (coordinadora), Ana Paula Arato Gonçalves, Fabio Gallo Junior, Leticia de Almeida Chaves, Carmen Saraiva y Tatiana Simão. Otros estudios acerca de la microestructura del hormigón y de la corrosión del acero también han sido realizados en el ámbito de la Tarea n° 3.

Un primer aspecto que cabe aclarar es que la investigación plantea el cambio de paradigma con respecto a la durabilidad de las estructuras de hormigón visto carbonatado, tal como fue propuesto por Angst et al. (2020). En lugar de basarse en el modelo de que la pérdida de la capa pasivadora del acero lleva a su corrosión, la durabilidad debe abordarse desde la visión sistémica que analiza las condiciones en las que la carbonatación conduce a daños estructurales. Más precisamente, en qué medida inciden esas condiciones y con qué consecuencias.

Desde el punto de vista técnico y de la preservación del patrimonio, las propuestas de Angst et al. (2020) se adhieren a la recuperación de estructuras de hormigón visto de la arquitectura moderna, ya que en estas el frente de carbonatación ha alcanzado la profundidad del refuerzo y la corrosión atmosférica del acero es el mecanismo predominante de degradación. Sin embargo, este cambio de paradigma requiere un conocimiento más profundo de los materiales, así como de la configuración estructural y constructiva y su ambiente circundante.

Por lo tanto, el texto propone un primer abordaje del tema, presentando el estado de conservación del hormigón y las condiciones del entorno del edificio Vilanova Artigas, desde el que se discuten los problemas y retos de la conservación de sus fachadas.

Método

Relevamientos y ensayos *in loco* se llevaron a cabo en el marco del proyecto KIM. Sin embargo, la experiencia previa de la autora, producto del seguimiento y documentación de las intervenciones realizadas en el edificio desde 2005, fue decisiva para la construcción de la referencia que permitió el avance de los estudios, junto con la contribución documental aportada por el equipo responsable de la Tarea n° 1 (véase el artículo n° 1). Con estas subvenciones, la primera fase de la Tarea n° 3 comprendía relevamientos y ensayos realizados por los investigadores del proyecto y técnicos de las instituciones asociadas a la investigación.¹ El Cuadro n° 1 informa las actividades de la primera etapa. El detalle completo

ACTIVIDADES	NIVELES DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO	VARIABLES Y CARACTERÍSTICAS DE INTERÉS DEL ESTUDIO
Relevamiento y reconocimiento del entorno.	Características ambientales.	Identificar posibles riesgos estructurales.	Temperatura, humedad relativa, precipitación, intensidad y dirección del viento, contaminantes, masa vegetal.
Investigación de las fachadas.	Inspecciones visuales a simple vista o con el uso de binoculares.	Detectar características de las fachadas: reparaciones estructurales realizadas en la intervención 2013-2015, patrones superficiales del hormigón, manifestación patológica aún no registrada.	Área de reparaciones estructurales (laser scanning), textura, cavidades superficiales, discontinuidades, manchas y fisuras.
	Ensayo <i>in loco</i> .	Inferir el nivel de protección de los refuerzos por el hormigón.	Carbonatación, absorción de agua superficial, espesor del recubrimiento.

CUADRO 1. RESUMEN DE LAS ETAPAS INICIALES DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA TAREA N° 3.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

de las actividades realizadas está disponible en el informe técnico del proyecto (Pinheiro et al., 2018).

En los puntos posteriores se presentan consideraciones sobre los métodos y protocolos adoptados, los resultados y los respectivos análisis, agrupados por temas: características ambientales y aspecto general de las fachadas; características superficiales y textura; ensayos *in loco*: carbonatación y absorción de agua; disposición de las armaduras.

Características ambientales y aspecto general de las fachadas

En la imagen que trae la implantación del edificio [Fig. 1] se pueden observar las masas vegetales cerca de las fachadas, especialmente en la fachada noreste, creando un microclima que favorece el sombreado y aumenta el tiempo de humidificación del hormigón.

En base a series históricas de 1967 a 2015 se sabe que los valores medios de precipitación mensual en São Paulo oscilaron entre 36,4 mm (invierno) y 256,2 mm (verano). El análisis de series históricas de 1961 a 2016 indica humedad relativa media local de entre 65% y 85% y temperatura media compensada entre 15°C y 25°C.

El clima de São Paulo, con características de clima tropical húmedo con inviernos secos, favorece el avance del proceso de corrosión en estructuras de hormigón, ya que ofrece condiciones tanto para su humidificación frecuente (disminuye la resistencia del medio al flujo de corriente de corrosión) como para el acceso de oxígeno a la interfaz hormigón-acero (agente oxidante de las reacciones de corrosión) (Almeida y Panossian, 1999). Sin embargo, la tendencia de intensificación del régimen de lluvias se verifica en el año 2017, en el que se registraron 1648,8 mm de lluvia y un total de 187 días de precipitaciones (Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciencias Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2017). El valor es un 16,7% superior a la media climatológica, teniendo en cuenta la serie histórica

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo y Universidad de Ferrara.

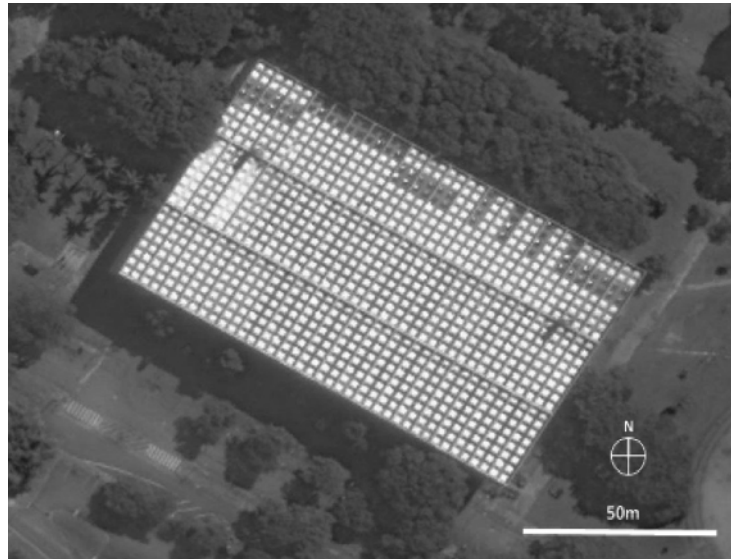


FIGURA 1. EMPLAZAMIENTO DEL EDIFICIO VILANOVA ARTIGAS. FUENTE: GOOGLE MAPS (2015).

desde 1933. La tendencia de aumento de la frecuencia e intensidad de lluvia en la región metropolitana de São Paulo [RMSP] también ha sido confirmada por otros estudios recientes de series históricas (Marengo et al., 2020).

El edificio está emplazado en zona urbanizada de una metrópolis, cerca de autopistas con intenso tráfico vehicular, donde el principal contaminante del aire es el monóxido de carbono [CO]. La concentración de este osciló entre 20381 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (17800 ppb) y 2862,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2500 ppb) entre 1981 y 2015. En el mismo período, el dióxido de azufre [SO_2] osciló entre 242 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6633,5 ppb) y 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (28,8 ppb). No hay evidencia de fuentes locales de contaminantes de cloruro.

El Cuadro n° 2 muestra los resultados de *laser scanning* con la identificación de áreas reparadas, con mortero de reparación estructural, en las caras externas de las fachadas durante la intervención 2013-2015 y el porcentaje respectivo de reparaciones en relación con la superficie total del hormigón visto.

FACHADA	ÁREA DE LA FACHADA (M ²)	ÁREA DE REPARACIÓN (M ²)	RELACIÓN ENTRE ÁREAS (%)
NO	588,62	94,20	16,0
NE	909,92	333,36	36,6
SO	992,90	162,71	16,4
SE	588,14	140,72	23,9
TOTAL	3079,60	730,99	23,7

CUADRO 2. ÁREA DE REPARACIONES REALIZADAS EN LA CAMPAÑA DE INTERVENCIÓN 2013-2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se constató que las fachadas con el porcentaje más alto y más bajo de reparaciones eran la noreste y noroeste, respectivamente, razón por la que ambas se seleccionaron para la extracción de testigos. La fachada noreste tiene más de un tercio del hormigón original reemplazado por mortero de reparación estructural. Esta condición probablemente se agravó por la prolongada humidificación de la superficie del hormigón [Fig. 2]. La fachada sureste tiene el segundo porcentaje más alto de reparaciones: 23,9% de la superficie exterior. Tal vez esto fue recrudescido por su grado de exposición a la lluvia, explicación que se discute más adelante en el texto.

A continuación, se realizó un estudio visual de los puntos de las fachadas con acumulación de productos de corrosión. Los resultados se muestran en el Cuadro n° 3.

La primera hipótesis es que han surgido nuevos focos de corrosión de la armadura después de la intervención concluida en 2015. A medida que la manifestación visual ocurre después de cambios internos, como la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón, la situación inspira cuidado. La continuidad de los ensayos de corrosión permitirá comprender esta manifestación. Otra hipótesis se refiere a la posible oxidación de la pirita [sulfuro de hierro FeS_2], detectada en el agregado grueso de las fachadas en el análisis petrográfico (Pinheiro et al., 2018). Esta segunda hipótesis se apoya en observaciones divulgadas por Douglas (2015) sobre manchas, en el hormigón visto, resultantes de la reacción de la pirita presente en los agregados. Esta hipótesis aún requiere verificación a través de una prueba que se realiza con un fragmento extraído de la fachada, por lo que es necesaria una nueva autorización de los organismos de protección del patrimonio. La tercera hipótesis es que las manchas están asociadas con la oxidación de la armadura expuesta (sin indicios del efecto expansivo de la corrosión) por fallas de llenado en la construcción original, la corrosión de pasadores o barras de acero utilizadas para la estabilización de los encofrados.

Otra condición investigada es el grado de exposición de cada fachada del edificio a la lluvia, que se puede inferir a través del índice de lluvia conducida por el viento o Wind-Driven Rain Index [WDR].

El WDR, presentado en De Andrade et al. (2018), se calculó, sobre la base de datos del año 2016, para los meses de enero y febrero (verano) y los meses de

FACHADA	ÁREA (M ²)	PUNTOS DE CORROSIÓN	DENSIDAD DE PUNTOS DE CORROSIÓN (PUNTOS/M ²)
SO	907,5	153	0,169
SE	544,5	58	0,107
NE	808,5	71	0,088
NO	544,5	131	0,241
TOTAL	2805	413	0,147

CUADRO 3. PUNTOS DE CORROSIÓN DETECTADOS EN LAS FACHADAS POR OBSERVACIÓN VISUAL, A SIMPLE VISTA Y CON LA AYUDA DE BINOCULARES, EN EL AÑO 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



FIGURA 2. FOTOGRAFÍAS DE TRAMOS DE LAS FACHADAS CON MANCHAS DE HUMEDAD REGISTRADAS DESPUÉS DE LLUVIA DE BAJA INTENSIDAD DURANTE EL OTOÑO. FUENTE: CLAUDIA OLIVEIRA (2017).

julio y agosto (invierno), representativos del período de precipitaciones anuales más altas y más bajas, respectivamente. La fachada sureste fue la más afectada por las lluvias en verano, con un WDR = 4 m²/s, y las fachadas sureste, con un WDR = 0,008 m²/s, y noroeste, con un WDR = 0,006 m²/s, fueron las más afectadas en invierno, aunque en diferente magnitud. Los parámetros se comparan con las referencias internacionales que clasifican los valores WDR³ 4 m²/s como característicos del grado moderado de exposición (Chand y Bhargava, 2002) o al límite entre el alto y muy alto grado de exposición (Qian y Zhang, 2021).

La humedad es más intensa en la fachada noreste, aunque claramente perceptible en la fachada suroeste. La fachada sureste, la más vulnerable a la lluvia, presenta manchas más pequeñas. En la fachada noroeste las zonas de humidificación también son más discretas, pero no son fácilmente perceptibles en el registro fotográfico debido a la proximidad de la vegetación (árboles grandes).

Las manchas son indicios de la ineficacia del hidrófugo aplicado en 2014, ya sea debido a la ineficacia del producto especificado o al efecto residual de la protección, puesto que la durabilidad del producto aplicado es de dos años, según el fabricante. No obstante, es probable que las zonas con mayor retención de humedad superficial también sean áreas con mayor incidencia de fallas superficiales y fisuras. Las manchas en la fachada noreste también son el resultado de la proximidad de la vegetación que dificulta la pérdida de agua de la superficie.

Para las grandes superficies desprotegidas, la influencia del estado de conservación del hormigón en la interacción con el medio ambiente es notable, reiterando la necesidad de los ciclos de mantenimiento preventivo.

Características superficiales y textura

Las características y la textura de las superficies resultan de las especificaciones de proyecto relativas al uso de moldes con tablas de pino (30 cm de ancho) en su estado natural [Fig. 3] y también de los métodos de llenado de la estructura. La textura de los granos de los moldes de madera sobre la superficie del hormigón, típica de la arquitectura moderna, es uno de los principales atributos estéticos del edificio.

Las variaciones tanto en el posicionamiento como en la estabilidad y estanqueidad de los encofrados se evidencian en los detalles visibles, proporcionando diferentes relieves y texturas a la superficie del hormigón. Además, las cavidades (~1 cm de diámetro) y los defectos de superficie suelen ser el resultado del aire aprisionado durante el llenado y del efecto «pared» del encofrado. La segregación y las variaciones de tonalidad son efectos de la compactación del hormigón y de la variación de dosificación de los materiales entre distintas etapas de llenado.

Además, el relevamiento completo del estado de fisuración de las fachadas es necesario, especialmente por las fisuras indicativas de los esfuerzos en regiones más solicitadas, como en las zonas típicas de mala adherencia del refuerzo. En esas zonas el estado de fisuración se agrava por la baja adherencia entre el hormigón y el refuerzo corroído. Fisuras y desplazamientos de las fachadas conformarán la base de datos para la elaboración del modelo analítico estructural en desarrollo, detectando regiones con mayor concentración de tensión y deformaciones.

Estas características comprometen la durabilidad de la superficie y también imponen desafíos a su protección, como, por ejemplo, la necesidad de llenar fisuras o defectos de la superficie con aberturas superiores a 0,3 mm antes de la aplicación del hidrófugo, según datos experimentales de Meier y Wittmann (2011).

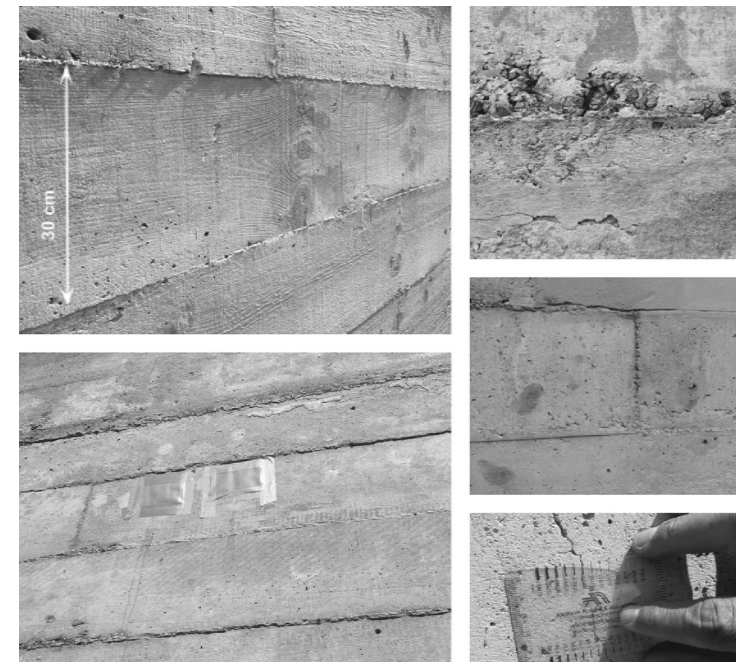


FIGURA 3. CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIES EXTERNAS DE LAS FACHADAS. FUENTE: COLECCIÓN CONSERVAFU (2016-2017).

Ensayos *in loco*: carbonatación y absorción de agua

Para los testigos extraídos de la fachada noroeste, la profundidad de carbonatación osciló entre 1 mm y 2 mm en la cara exterior y 14 mm y 18 mm en la cara interior. Para los testigos extraídos de la fachada noreste, la profundidad de carbonatación osciló entre 20 y 25 mm en la cara exterior y 30 mm en la cara interior [Fig. 4].

Estos datos confirman que, comúnmente, la profundidad de carbonatación es mayor en lugares con menor humedad (cara interna de las fachadas), pero la mayor profundidad de carbonatación y la consiguiente pérdida de pasivación del acero no son condiciones suficientes para la corrosión del refuerzo. Hasta la fecha, en cincuenta años de servicio, no hubo registro de daños causados por la corrosión de la armadura en las superficies internas de estas fachadas.

Las profundidades de carbonatación medidas son equivalentes o inferiores a los valores máximos medidos por otros investigadores en edificios de hormigón visto con más de cincuenta años de servicio: 76 mm a 102 mm (Edelson, 2007); 31 mm a 43,5 mm (Buchner y Pepi, 2015); 5 mm a 95 mm (Maldonado-Madala et al., 2017).

La geometría de las reparaciones es también una característica importante para el registro y análisis. La escarificación de algunas áreas de reparación, para pruebas en los refuerzos [Fig. 5], permitió la inferencia de sus profundidades, con resultados promedio de 20 mm y no superior a 40 mm.

Las fachadas están conformadas por vigas de gran altura que poseen un espesor de 0,20 m. Las alturas son las siguientes: 7,25 m, viga de fachada noreste; 8,15 m, vigas de fachadas noroeste, sureste y suroeste. Están densamente armadas, con recubrimiento de refuerzo en el rango predominante de 10 mm [Fig. 8]. Cabe destacar que la profundidad de las reparaciones equivale a una parte representativa (10% a 20%) del espesor de la sección transversal de las fachadas.

La capacidad del hormigón para absorber agua se precisó a través de ensayos *in loco*. La absorción superficial de agua se caracteriza por el fenómeno

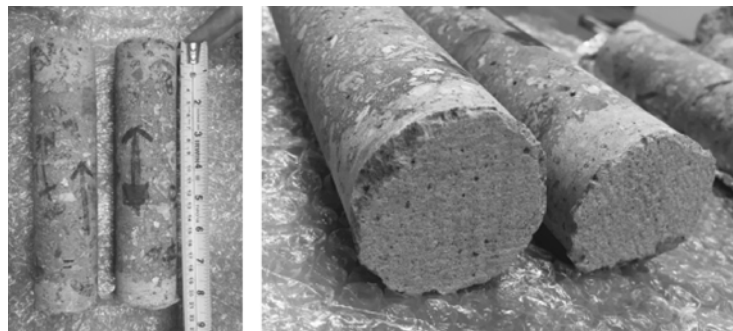


FIGURA 4. (A) TESTIGOS EXTRAÍDOS DE LA FACHADA N.E., CON DIÁMETRO 50 MM Y LONGITUD 20 MM. (B) AMPLIACIÓN DE LOS TESTIGOS QUE MUESTRAN LA TEXTURA MÁS RUGOSA Y POROSA DE LA SUPERFICIE EXTERIOR DE LA FACHADA (CAPA CON ESPESOR ENTRE 2 MM Y 3 MM). FUENTE: COLECCIÓN CONSERVAFU (2017).



FIGURA 5. ESCARIFICACIÓN DEL ÁREA DE REPARACIÓN PARA ENSAYOS CON ARMADURA EN ÁREA DE ARREGLO EJECUTADO EN 2013. LA REPARACIÓN ILUSTRADA TIENE UNA PROFUNDIDAD DE ENTRE 20 MM A 25 MM. FUENTE: COLECCIÓN CONSERVAFU (2017).

de la capilaridad y permite inferir las propiedades de la superficie del material, determinantes en la durabilidad del hormigón.

Inicialmente se probó un método semidestructivo, utilizando un equipo para medir la absorción superficial de agua,² con un dispositivo que se fijó en la superficie del hormigón. En los diversos intentos no fue posible obtener resultados fiables debido a la dificultad de acoplamiento del dispositivo (cámara llena de agua a baja presión) a la superficie de hormigón, incluso en regiones sin muchas irregularidades. El método fue también abandonado por los vestigios en la superficie. A continuación, se adoptó el ensayo del tubo Karsten descrito originalmente en Rilem (1980), ensayo no destructivo que evalúa la absorción superficial de agua, por capilaridad, del material a baja presión [Fig. 6].

El tubo Karsten es un método ampliamente utilizado para el estudio de revestimientos de mampostería y de construcción en piedra. Aunque con fines

² Equipo Poroscope C-P-6000 C-P-6050, James Instruments.

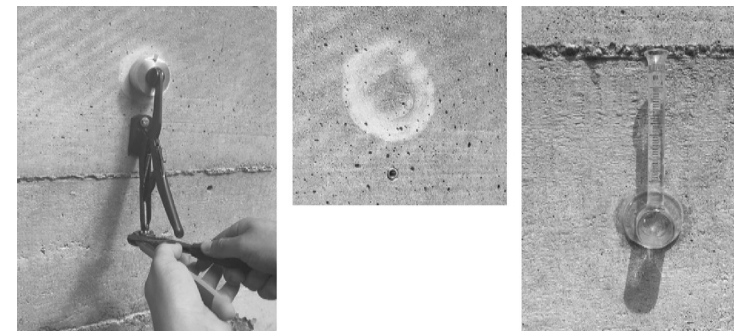


FIGURA 6. (A) FIJACIÓN DE LA CÁMARA PARA EL ENSAYO CON EL POROSCOPE. (B) AMPLIACIÓN DEL ÁREA EROSIONADA PARA FIJAR LA CÁMARA DEL POROSCOPE. (C) TUBO KARSTEN FIJADO A LA FACHADA. FUENTE: COLECCIÓN CONSERVAFU (2017).

comparativos, se trata también de un método indicado para el control de la aplicación de hidrófugo en estructuras de hormigón ante la imposibilidad de extraer testigos para la verificación de la penetración del hidrófugo (Raupach y Büttner, 2014).

La norma EN 16302:2013 (European Standard, 2013) se adoptó como referencia, con mediciones del nivel del agua en el capilar realizadas en los siguientes intervalos: 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 60 min, 120 min y 180 min. El resultado se presenta en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ a efectos de la comparación con datos de investigaciones llevadas a cabo en morteros de revestimiento. El coeficiente de absorción de agua, como se describe en Duarte et al. (2020), se puede obtener gráficamente como el coeficiente angular de la línea en el gráfico que correlaciona la masa de agua absorbida por área ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) y el tiempo en \sqrt{t} .

Los tubos se fijaron con silicona que, después de los ensayos, fue retirada con agua caliente, detergente neutro y acción mecánica con cepillo con cerdas de *nylon*, sin dejar vestigios notables.

A pesar de todos los intentos, solo se logró completar un ensayo. Se trata del ensayo en la fachada sureste, realizado en abril de 2017 en un día sin precipitaciones y con temperatura y humedad relativa de 24 °C y 82%, respectivamente. La humedad superficial del área de ensayo, medida por medio de un instrumento con sensor capacitivo, varió entre el 4% y el 7%.

En el momento del ensayo, la protección por hidrófugo (base silano-siloxano, aplicado en 2014) tenía todavía un efecto residual. El resultado del ensayo, teniendo en cuenta el tiempo de medición de 180 min, indicó un coeficiente de 0,2177 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$. Dada la escasez de resultados referenciales de ensayos no destructivos ejecutados en estructuras de hormigón, se adoptan resultados de ensayos realizados en morteros, ampliamente difundidos en la literatura. Los ensayos ejecutados por Apps (2011), por ejemplo, indican coeficiente medio de absorción de agua que va desde 0,05 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ a 0,28 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ para mortero, predosificado, base cemento con adición de resina. El ensayo realizado en la fachada sureste aporta evidencias de que el hormigón, bajo las condiciones actuales, tiene absorción superficial de agua dentro de un rango consistente con morteros de revestimiento base cemento.

Cuando existe la posibilidad de extraer pequeños testigos para la medición de la absorción de agua superficial, los resultados de las pruebas de laboratorio pueden compararse con la referencia de 0,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$, indicada como el valor máximo de absorción de la superficie de agua en la norma EN 13057:2002 (European Standard, 2002) para estructuras de hormigón en general. Por lo tanto, es necesario correlacionar el coeficiente obtenido en ensayos de laboratorio con el coeficiente obtenido en el campo a través de ensayos no destructivos (con tubo Karsten, por ejemplo) bajo las condiciones climáticas y de humedad del hormigón. El objetivo de tales correlaciones es proponer soluciones de bajo impacto para la conservación del patrimonio de hormigón.

Cabe señalar que, dada la escala del edificio en cuestión, tanto la realización como la calibración de dichos ensayos resultan impracticables sin infraestructura que garantice el acceso a las fachadas con relativa facilidad y seguridad.

Disposición de las armaduras

Durante la intervención de emergencia 2013-2015 (ver artículo n° 1) fue posible registrar imágenes de varios tramos de las armaduras de las fachadas, su estado de conservación, su posicionamiento y el espesor del recubrimiento de hormigón [Fig. 7]. Gran parte del refuerzo estaba a la vista después de la primera limpieza con chorro de agua a presión baja, con la eliminación de partes sueltas del hormigón. Las fallas constructivas en la disposición de las varillas resultan de la falta de separadores adecuados en cantidad y dimensión para garantizar el recubrimiento. También se puede observar que el proceso constructivo no garantizó una distancia adecuada entre las varillas del refuerzo principal (varillas longitudinales con diámetro 25 mm en el borde de la viga). Estas características, típicas del proyecto y del proceso de construcción en aquella época, afectan la durabilidad de la estructura.

En algunas partes, la pérdida de masa del hormigón fue de una intensidad tal que dejó expuestas las varillas del refuerzo a flexión de la viga. En la última intervención se sustituyeron las varillas con pérdida de sección y se recompuso la sección de hormigón de acuerdo con especificaciones de diseño, siguiendo los procedimientos típicos de ingeniería de rehabilitación de estructuras de hormigón armado.

En base a las observaciones realizadas en el año 2013 [Fig. 7], las armaduras con bajo espesor de recubrimiento y, por lo tanto, más propensas a la corrosión, son las armaduras para control de la fisuración (diámetro 8 mm), que están dispuestas en malla ortogonal cada 12 cm o 20 cm, según se indica en las hojas del proyecto estructural.

La variación en el espesor del recubrimiento de las armaduras se confirmó mediante mediciones tomadas en 393 posiciones, con detector de metales, cuya distribución se presenta en la Figura n° 8.

Como se puede ver, hay un predominio de espesores de recubrimiento en el rango de hasta 10 mm en los refuerzos para control de la fisuración.

La variación en el recubrimiento, asociada a las condiciones de humidificación del hormigón, influye en los cambios por los que pasan las superficies externas de estas fachadas, con impactos significativos en la durabilidad del hormigón y en la apariencia de las fachadas.



FIGURA 7. ARMADURAS CORRÓIDAS DESPUÉS DE LA REMOCIÓN DEL HORMIGÓN DESPRENDIDO. FUENTE: CLAUDIA OLIVEIRA Y RODRIGO VERGILI (2013).

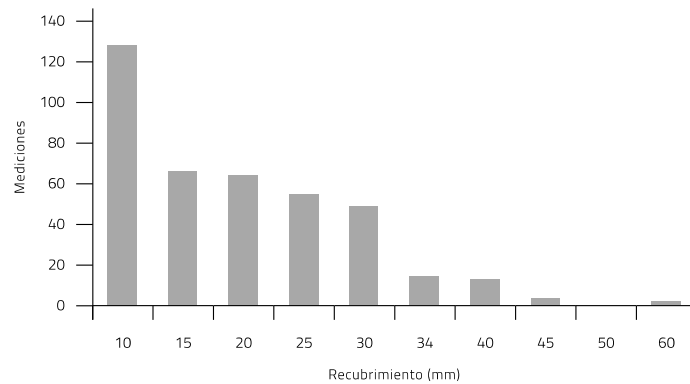


FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE LOS ESPESORES DE RECUBRIMIENTO DE LAS ARMADURAS MEDIDOS EN LAS FACHADAS DEL EDIFICIO ARTIGAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Conclusión

Las condiciones y características críticas de las fachadas son la absorción superficial del agua, la intensidad y el tiempo de humidificación de la superficie del hormigón, ya que son determinantes en el proceso de corrosión del refuerzo y, por tanto, en la durabilidad de la estructura. Los resultados publicados por De Araújo, De Andrade y Da Silva (2021) demuestran que, para la estructura en cuestión, expuesta a períodos intermitentes de humidificación, el contenido de humedad del hormigón es un parámetro controlador de la resistividad eléctrica del hormigón ya carbonatado y, en consecuencia, de la tasa de corrosión del refuerzo.

A partir de los relevamientos realizados y de las inspecciones hechas, se estructuraron tres líneas de investigación de posgrado. La primera comenzó con los trabajos de Castro (2018) sobre estudios de armonización cromática y de la textura entre hormigón y materiales de reparación. La segunda línea se ocupa de los sistemas de protección de superficies de hormigón a través de tratamientos no invasivos (hidrófugos conjugados con aditivos inhibidores de la corrosión) e incluye, también, la investigación de métodos no destructivos para el control de la aplicación del hidrófugo en la estructura. La tercera línea se centra en el desarrollo del modelo analítico estructural de las fachadas del edificio para verificar sus estados de tensión y deformación, detectando regiones más críticas en las que los efectos de la corrosión pueden conducir a la pérdida de la capacidad resistente de la estructura.

Las investigaciones ya llevadas a cabo, asociadas a estudios en curso, proporcionan una nueva comprensión del desempeño del hormigón visto que da más coherencia a las nuevas propuestas de intervención, teniendo en cuenta la urgencia de garantizar las condiciones de seguridad y la funcionalidad de la estructura sin perder el sentido del compromiso de preservar sus valores patrimoniales

Bibliografía

- Almeida, N.L. y Panossian, P. (1999). *Corrosão atmosférica 17 anos*. San Pablo: IPT.
- Angst, U. et al. (2020). Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Rilem Technical Letters*, 5, pp. 85-100. doi: 10.21809/rilemtechlett.2020.127
- Apps, C. A. C. P. (2011). Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas. (Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa).
- Buchner, L. N., y Pepi, R.M. (2015). Restoration of the cast-in-place concrete at the New York Hall of Science. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 46 (2-3), pp. 54-63. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/43556453>
- Castro, C. S. S. M. de. (2018). Para além das aparências: contribuição ao estudo da conservação de superfícies arquitetônicas de concreto aparente. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo).
- Chand, I. y Bhargava, P. K. (2002). Estimation of driving rain index for India. *Building and Environment*, 37 (5), pp. 549-554. doi: 10.1016/S0360-1323(01)00057-9
- De Araújo, A., De Andrade, C. y Da Silva, T. (2021). Current condition of the exposed concrete façades reinforcement of the Vilanova Artigas building: modern architectural heritage. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 14 (1), e14113. doi: 10.1590/s1983-41952021000100013
- De Andrade, C., Gallo Junior, F., Gonçalves, A. P. A. y Chaves, L. A. (2018). Task 3: Characteristics and conservation of the exposed reinforced concrete of the Vilanova Artigas Building (Fauusp). En M. L. B. Pinheiro (Coord.). *Subsides for a Conservation Management Plan for Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo – Fauusp)* [Final Report] (pp. 203-345). San Pablo: Keeping It Modern Program. The Getty Foundation. Recuperado de: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas
- Douglas, S. A concrete performance: conservation at the National Theatre. *Engineering History and Heritage*.(2015). *Institute of Civil Engineerings – ICE*, 169 (EH1), pp. 36-41. doi: 10.1680/jenhh.15.00009
- Duarte, R., Flores-Colen, I., de Brito, J. y Hawreen, A. (2020). Variability of in-situ testing in wall coating systems - Karsten tube and moisture meter techniques. *Journal of Building Engineering*, 27. doi: 10.1016/j.job.2019.100998
- Edelson, R. (2007, enero). The Pentagon lightwell walls: repair, rehabilitation and protection for the next 50 years. *Structure Magazine*, pp. 34-36.
- European Standard. (2002). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption* (EN 13057).
- European Standard (2013). *Conservation of cultural heritage – test methods – measurement of water absorption by pipe method* (EN 16302).
- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São

Paulo (2017). *Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP*. IAG.
Recuperado de <http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2017.pdf>

Maldonado-Bandala, E. E., Nieves-Mendoza, D., Vela-Jiménez, J.L. y Castro-Borges, P.
(2017). Avaliação de problemas patológicos associados à carbonatação e sulfatos em
uma torre de concreto com mais de 50 anos de serviço. *Alconpat Journal*, 8(1), pp. 94-
107. doi: 10.21041/ra.v8i1.284

Marengo, J. A. et al. (2020). Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters
in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of
Sciences*, 1472(1), pp. 5-20. doi: 10.1111/nyas.14307

Meier, S. J. y Wittmann, F. H. (2011). Water Repellent Surface Impregnation of Concrete:
Guidelines and Recommendations. En F. H. Wittmann y O. Mercier (Eds.), *Basic research
on concrete and applications* (pp. 49–66). Actas del Asmes International Workshop
realizado en Lausanne, Suiza, en Julio de 2011. Friburgo: Aedificatio.

Pinheiro, M. L. B. (Coord.). (2018). *Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova
Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo –
Faussp)*. [Final Report]. San Pablo: Keeping It Modern Program, The Getty Foundation.
Recuperado de: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas

Qian, T. y Zhang, H. (2021). Assessment of long-term and extreme exposure to wind-
driven rain for buildings in various regions of China. *Building and Environment*, 189. doi:
10.1016/j.buildenv.2020.107524

Raupach, M. y Büttner, T. (2014). *Concrete repair to EN 1504: diagnosis, design, principles and
practice*. Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group.

Rilem Commission 25-PEM. (1980). Recommended tests to measure the deterioration of
stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Journal of Materials and
Structures*, 13(75), 175-254.