








## Evaluación estructural de una edificación existente de hormigón armado mediante un enfoque complementario de inspección visual, ensayos no destructivos y prueba de carga.

J. G. Peredo Villarroel<sup>1</sup> , C. D. Rojas Quispe<sup>1</sup> , J. Lafuente Fernandez<sup>1</sup> ,  
J. Ticona Martinez<sup>1</sup> , H. N. Callao Corrales<sup>1</sup> , R. Solis<sup>1</sup> , J. H. Aquino Rocha<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [j.aquino@umss.edu.bo](mailto:j.aquino@umss.edu.bo)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1013>

Recibido: 19/01/2026 | Correcciones recibidas: 08/04/2026 | Aceptado: 11/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

### RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la aptitud estructural de una edificación existente de hormigón armado. La metodología se basa en la integración de inspección visual, ensayos no destructivos (esclerometría, velocidad de pulso ultrasónico y termografía infrarroja) y prueba de carga en losas. Los resultados evidencian un estado de conservación desfavorable, con heterogeneidad del material, degradación interna y un comportamiento estructural no uniforme. Como limitaciones, se reconoce la ausencia de ensayos destructivos y de información estructural detallada. La originalidad del estudio radica en la integración de técnicas de evaluación aplicadas a diferentes niveles del sistema estructural. Se concluye que la estructura no es plenamente apta para su uso en su estado actual.

**Palabras clave:** inspección visual; esclerómetro; VPU; termografía infrarroja; prueba de carga.

**Citar como:** Peredo Villarroel, J. G., Rojas Quispe, C. D., Lafuente Fernandez, J., Ticona Martinez, J., Callao Corrales, H. N., Solis, R., Aquino Rocha, J. H. (2026), “Evaluación estructural de una edificación existente de hormigón armado mediante un enfoque complementario de inspección visual, ensayos no destructivos y prueba de carga.” Revista ALCONPAT, 16 (2). pp. 268 – 291, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1013>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, todos los autores (J.G. Peredo Villarroel, C.D. Rojas Quispe, J. Lafuente Fernandez, J. Ticona Martinez, H.N. Callao Corrales, R. Solis y J.H.A. Rocha) participaron de manera equitativa en las diferentes etapas del estudio, incluyendo conceptualización, ejecución experimental, recolección y análisis de datos, así como en la redacción y revisión del manuscrito, con una contribución estimada del 14.3% por autor.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) 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 primer número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2026.

## **Structural assessment of an existing reinforced concrete building using a complementary approach based on visual inspection, non-destructive testing, and load testing.**

### **ABSTRACT**

This study aims to evaluate the structural suitability of an existing reinforced concrete building. The methodology is based on the integration of visual inspection, non-destructive testing (rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, and infrared thermography), and load testing on slabs. The results reveal unfavorable conditions, with material heterogeneity, internal degradation, and non-uniform structural behavior. Limitations include the absence of destructive testing and detailed structural information. The main contribution of the study lies in the integration of assessment techniques at different levels of the structural system. The structure cannot be considered fully suitable for use in its current condition.

**Keywords:** Visual inspection; Rebound hammer; UPV; Infrared thermography; Load testing.

## **Avaliação estrutural de uma edificação existente de concreto armado por meio de uma abordagem complementar de inspeção visual, ensaios não destrutivos e prova de carga.**

### **RESUMO**

Este estudo tem como objetivo avaliar a aptidão estrutural de uma edificação existente de concreto armado. A metodologia baseia-se na integração de inspeção visual, ensaios não destrutivos (esclerometria, velocidade de pulso ultrassônico e termografia infravermelha) e prova de carga em lajes. Os resultados evidenciam um estado de conservação desfavorável, com heterogeneidade do material, degradação interna e comportamento estrutural não uniforme. Como limitações, destaca-se a ausência de ensaios destrutivos e de informações estruturais detalhadas. A originalidade reside na integração de técnicas de avaliação em diferentes níveis do sistema estrutural. Conclui-se que a estrutura não é plenamente apta para uso em sua condição atual.

**Palavras-chave:** Inspeção visual; Esclerometria; VPU; Termografia infravermelha; Prova de carga.

#### **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. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo 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.

Evaluación estructural de una edificación existente de hormigón armado mediante un enfoque complementario de inspección visual, ensayos no destructivos y prueba de carga.

Peredo Villarroel, J. G., Rojas Quispe, C. D., Lafuente Fernandez, J., Ticona Martinez, J., Callao Corrales, ...

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del estado estructural de edificaciones de hormigón armado existentes constituye un desafío actual en la ingeniería civil, particularmente en estructuras expuestas a condiciones ambientales agresivas prolongadas y en aquellas donde la información del proyecto estructural original es incompleta o inexistente. Esta condición incrementa la incertidumbre asociada a la determinación de las propiedades mecánicas del material y del comportamiento estructural, dificultando la toma de decisiones sobre la seguridad y el desempeño en servicio (Bungey & Grantham, 2006; Bortolini & Forcada, 2018). En este contexto, es necesario garantizar un análisis apropiado de la estructura sin intervenciones destructivas, lo que implica una revisión de los enfoques tradicionales de evaluación, así como la adopción de metodologías integrales y actualizadas, que puedan generar información adecuada y consistente de las estructuras existentes y deterioradas (De Domenico *et al.*, 2022; Diaferio & Varona, 2024; Watt, 2025).

En la práctica profesional, la evaluación estructural de edificaciones existentes se apoya en la interpretación de resultados obtenidos mediante ensayos indirectos, particularmente ensayos no destructivos (END), complementados por el criterio del inspector o evaluador responsable (Ghosh *et al.*, 2016). Entre los END más utilizados se encuentran la inspección visual, el georradar (GPR), la esclerometría, la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), la termografía infrarroja y la resistividad eléctrica del hormigón. Estos métodos se caracterizan por ser no invasivos, de rápida aplicación y por permitir una evaluación preliminar del estado del hormigón y del refuerzo, aportando información sobre la calidad del material, la presencia de heterogeneidades o discontinuidades internas, así como sobre las condiciones de durabilidad y el potencial riesgo de corrosión de las armaduras (Ali-Benyahia *et al.*, 2023; Krentowski *et al.*, 2023; Boccacci *et al.*, 2024). En conjunto, estas técnicas permiten identificar zonas deterioradas, variaciones de compacidad y presencia de humedad, proporcionando información relevante para el diagnóstico estructural y la toma de decisiones técnicas (Gupta *et al.*, 2022; Alqurashi *et al.*, 2022).

No obstante, pese a su amplia difusión, los END presentan diversas limitaciones, puesto que se trata de métodos indirectos sensibles a factores como la carbonatación, el contenido de humedad, la condición superficial del hormigón y su heterogeneidad. Estas influencias pueden conducir a una sobreestimación o subestimación de las propiedades mecánicas, especialmente en estructuras antiguas y con deterioro avanzado, comprometiendo la confiabilidad de los END como herramientas únicas de apoyo a la toma de decisiones de reparación y/o refuerzo estructural (Malhotra & Carino, 2003; Abdollahi-Mamoudan *et al.*, 2025).

Por otra parte, la prueba de carga constituye una herramienta experimental directa para la evaluación del comportamiento de estructuras existentes, ya que permite verificar la respuesta global de la edificación bajo condiciones controladas de servicio mediante la medición de deflexiones, deformaciones residuales y recuperación elástica (*American Concrete Institute*, 2025). Entre diversas normativas que pueden ser utilizadas para la prueba de carga, la norma ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025) proporciona un marco objetivo para evaluar si el comportamiento observado es compatible con un desempeño estructural seguro. Sin embargo, la aplicación de pruebas de carga normalmente se aborda como un procedimiento independiente, sin una complementariedad con resultados obtenidos mediante otros ensayos, como los END.

La literatura científica y técnica presenta una limitada disponibilidad de enfoques metodológicos complementarios que permitan relacionar de manera directa los resultados obtenidos mediante END con el comportamiento estructural observado durante pruebas de carga (Olaszek *et al.*, 2014; Abedin *et al.*, 2022). Esta situación reduce la aplicabilidad técnica de los END en el proceso de evaluación de estructuras existentes, particularmente en aquellas que presentan un estado de deterioro avanzado asociado a procesos de carbonatación y pérdida de durabilidad, donde la incertidumbre respecto al desempeño estructural real resulta elevada.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la aptitud estructural de una

edificación existente de hormigón armado mediante un enfoque basado en la integración de inspección visual, END y prueba de carga, con el fin de apoyar la toma de decisiones técnicas respecto a su posible uso, intervención o rehabilitación. El enfoque se desarrolla a través de un estudio de caso de una edificación con deterioro avanzado, donde los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas se analizan de forma conjunta, permitiendo establecer un diagnóstico estructural más representativo del estado real de la edificación. La contribución principal del estudio radica en demostrar que la integración de resultados provenientes de END y de la prueba de carga permite identificar los alcances y limitaciones de cada técnica, fortaleciendo el proceso de evaluación estructural y la toma de decisiones en contextos de información limitada.

## 2. METODOLOGÍA

El presente trabajo corresponde a un estudio de caso con carácter metodológico aplicado, cuyo objetivo es evaluar la aptitud estructural de una edificación existente mediante la integración de diferentes técnicas de evaluación. El estudio presenta un carácter diagnóstico, al analizar el estado estructural de una edificación específica, y a su vez demostrativo, al evidenciar la aplicabilidad de la metodología propuesta en condiciones reales de campo.

### 2.1 Enfoque metodológico propuesto

La metodología adoptada se basa en la aplicación complementaria de END y prueba de carga estática, constituyendo una propuesta para la evaluación estructural de una obra existente mediante un estudio de caso. La Figura 1 presenta el detalle del procedimiento seguido en el presente estudio.

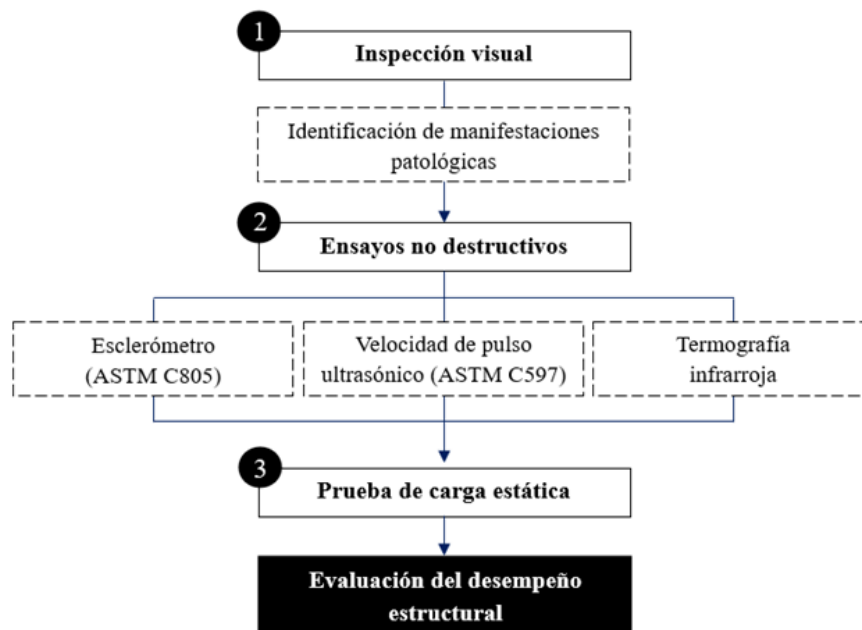


Figura 1. Procedimiento propuesto.

Se estableció un marco de decisión basado en la interpretación conjunta de los resultados obtenidos mediante inspección visual, END y prueba de carga. Se definieron tres escenarios posibles basados en la literatura (Harris, 2001; Watt, 2025): (1) apta para uso, cuando los elementos estructurales cumplen los criterios de servicio y no presentan deterioro significativo; (2) apta con restricciones, cuando se identifican deficiencias parciales pero la estructura mantiene un comportamiento estable bajo carga; y (3) no apta, cuando se evidencian deterioro avanzado, baja calidad del material o incumplimiento de los criterios de referencia en la prueba de carga. La evaluación consideró: (a)

la severidad del deterioro identificado mediante inspección visual; (b) la calidad del material estimada a partir de los END, y (c) el cumplimiento de los criterios de referencia de la prueba de carga según ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025).

El enfoque complementario adoptado no implica la aplicación de todas las técnicas sobre los mismos elementos estructurales, sino la integración de resultados obtenidos en distintos componentes del sistema, considerando las limitaciones prácticas de cada método. En este sentido, los END fueron aplicados en vigas y columnas, mientras que la prueba de carga se ejecutó en losas, permitiendo evaluar la respuesta estructural bajo condiciones de servicio. La interpretación conjunta de los resultados permite establecer un diagnóstico estructural a nivel de sistema. Por tanto, la complementariedad del enfoque se fundamenta en la evaluación de diferentes niveles del sistema estructural —material, elemento y comportamiento global— y no en una correlación directa punto a punto entre técnicas aplicadas en un mismo elemento.

## 2.2 Descripción de la edificación evaluada

Se evaluó una edificación de hormigón armado de dos plantas con una antigüedad aproximada de 20 años, la cual no dispone de planos estructurales ni memoria de cálculo. La estructura está conformada por un sistema de losas alivianadas apoyadas sobre vigas y columnas de hormigón armado. La edificación se encuentra en estado de obra gruesa sin cubierta, permaneciendo expuesta al ambiente sin medidas de protección. A consecuencia de la exposición prolongada a condiciones ambientales adversas, la edificación presenta un estado de conservación desfavorable, evidenciado por diversas manifestaciones patológicas, descritas en la Sección 3.1.

En la Figura 2 se presentan los planos arquitectónicos de la planta baja y alta de la edificación, en los cuales se identifican los elementos estructurales evaluados. Los códigos utilizados identifican el tipo de elemento —columna (C) o viga (V)— y el nivel correspondiente —planta baja (B) o planta alta (A)—; por ejemplo, el código CB-1 corresponde a la primera columna identificada en la planta baja.

## 2.3 Programa experimental

### 2.3.1 Inspección visual

La inspección visual consistió en la observación directa y registro fotográfico del estado superficial de la edificación. Esta etapa permitió identificar elementos estructurales con manifestaciones patológicas y zonas con deterioro avanzado, así como elaborar un mapa de daños que permitió localizar y clasificar las principales patologías presentes en la estructura. La inspección visual fue concebida como una etapa de diagnóstico preliminar cualitativo, orientada a identificar manifestaciones patológicas relevantes, zonas críticas y elementos estructurales potencialmente comprometidos. Esta información permitió definir los puntos de aplicación de los END y la selección de las losas a ser evaluadas mediante prueba de carga, priorizando aquellos elementos con mayor evidencia de deterioro.

### 2.3.2 END

Para el ensayo de esclerometría se utilizó un esclerómetro digital Controls, modelo 58-C0181/DGT, siguiendo los lineamientos de la ASTM C805 (*ASTM International*, 2018). Debido a limitaciones geométricas, de accesibilidad y al reducido tamaño de algunas zonas evaluadas, el procedimiento fue adaptado mediante la aplicación de una malla regular de  $3 \times 3$  impactos por punto de evaluación. Los valores atípicos fueron descartados conforme a los criterios establecidos en la norma. Si bien esta adaptación puede influir en la representatividad estadística de los resultados, se priorizó la obtención de mediciones consistentes en múltiples puntos del elemento. En este sentido, los resultados son estimaciones indicativas de la calidad superficial del hormigón, más que como valores absolutos de resistencia. Los resultados obtenidos corresponden al número de rebote (NR) y a una estimación indicativa de la resistencia a la compresión (RC) superficial

proporcionada por el equipo. La interpretación consideró la influencia de la carbonatación del hormigón, evidenciada por la presencia de corrosión de armaduras y condiciones de exposición ambiental. En este contexto, se adoptó una reducción estimativa en el rango de 30–40 %, conforme a valores reportados en la literatura (Malhotra & Carino, 2003; Breyse, 2012; Kumavat et al., 2021), la cual se emplea como un criterio conservador para aproximar la resistencia mecánica efectiva del material. Este ajuste no representa una medición directa, sino una estimación orientativa para la interpretación de los resultados.

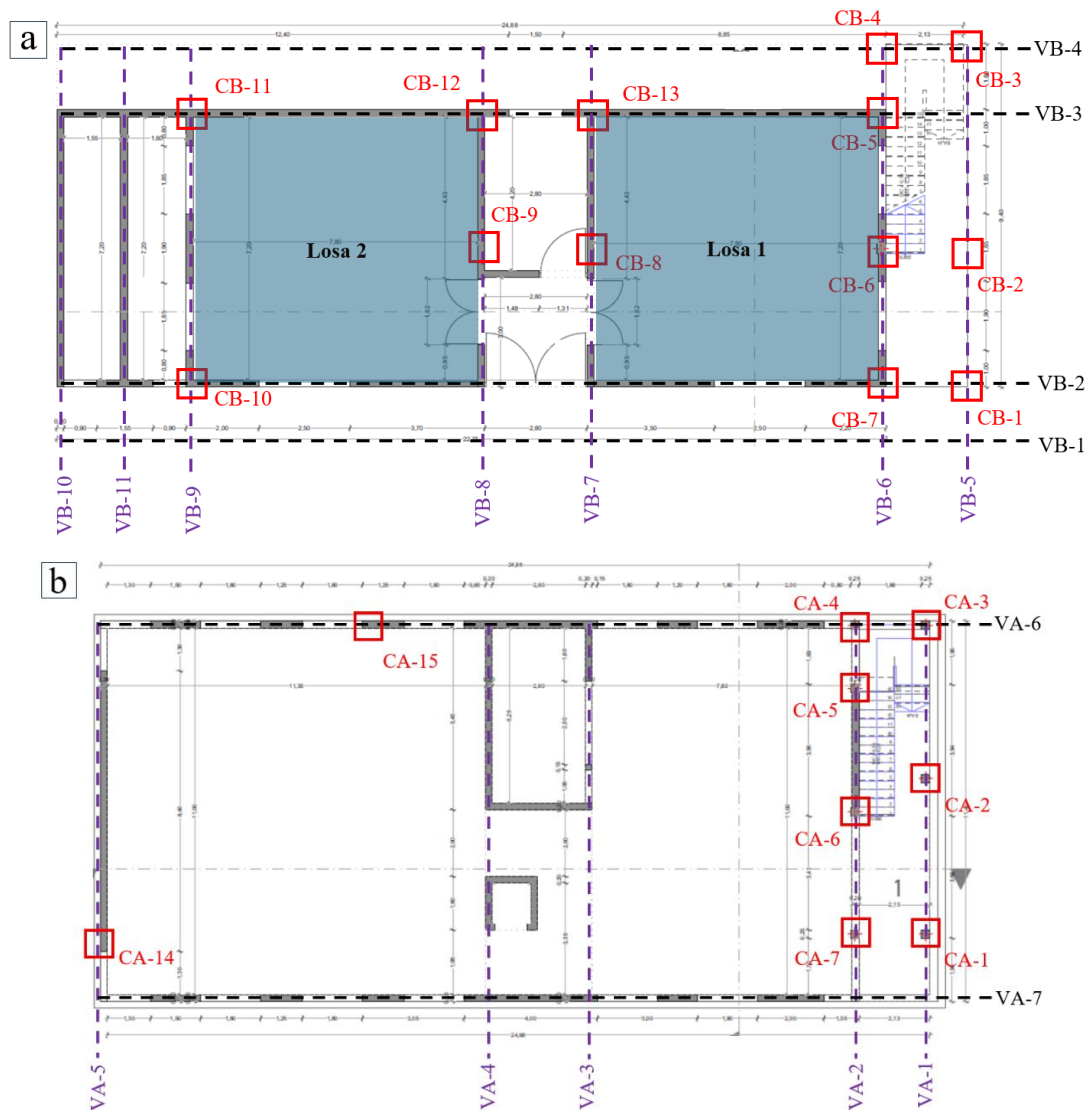


Figura 2. Planos de la edificación: (a) planta baja y (b) planta alta.

El ensayo de VPU se realizó mediante un equipo Controls, modelo 58-E4900, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C597 (ASTM *International*, 2016). Las mediciones se efectuaron en múltiples puntos de los elementos evaluados, coincidiendo con aquellos donde se aplicó el ensayo de esclerometría, a fin de permitir una comparación directa entre ambos métodos. En cada punto se registró el tiempo de propagación de la onda ultrasónica, el cual fue convertido en velocidad mediante la Ecuación (1). Los valores de VPU se utilizaron como indicadores de la calidad interna del hormigón y de la posible presencia de heterogeneidades, vacíos o discontinuidades internas (Aquino Rocha *et al.*, 2025).

$$VPU = d/t \quad (1)$$

Donde  $d$  es la distancia entre transductores (en m) y  $t$  es el tiempo de propagación de la onda ultrasónica (en s).

Como complemento a los END previamente descritos, se aplicó el ensayo de termografía infrarroja utilizando una cámara termográfica FLIR, modelo C2, con el objetivo de identificar anomalías térmicas asociadas al deterioro interno del hormigón, principalmente posibles delaminaciones del recubrimiento (Ichi & Dorafshan, 2022; Ibrahim et al., 2026). La termografía infrarroja se realizó bajo condiciones ambientales no controladas de una estructura existente expuesta al entorno en Cochabamba, Bolivia. Las mediciones se efectuaron en horario diurno, a una temperatura ambiental de aproximadamente 22 °C y una humedad relativa de 75 %, con presencia de radiación solar, lo que permitió generar gradientes térmicos naturales en la superficie de los elementos evaluados. No se aplicó un procedimiento de excitación térmica artificial, por lo que el análisis se basa en termografía pasiva (Rocha *et al.*, 2017).

### 2.3.3 Prueba de carga estática

La prueba de carga estática se realizó en dos losas de la edificación (Losa 1 y Losa 2), identificadas en la Figura 2. Si bien las dimensiones en planta de las losas son aproximadamente 11.8 × 7.8 m, para efectos del ensayo se consideraron únicamente las dimensiones efectivamente apoyadas, correspondientes a un claro de 7.8 × 7.2 m, definido por las condiciones reales de apoyo de la planta baja. El ensayo se desarrolló con base en los lineamientos establecidos en el Capítulo 27 de la ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025), sobre la evaluación de estructuras existentes, mediante la aplicación gradual y controlada de una carga equivalente a la carga de servicio. En condiciones ideales, la carga de ensayo debería aplicarse de forma uniformemente distribuida sobre toda la superficie de la losa. Sin embargo, debido a limitaciones prácticas y logísticas inherentes a estructuras existentes y a las características particulares de la edificación evaluada, se adoptó un procedimiento alternativo basado en el principio de equivalencia del momento flector máximo, concentrando la carga en un área central de 2.0 × 2.0 m, correspondiente a la zona más desfavorable desde el punto de vista estructural.

Para la determinación de la carga equivalente, se realizó un análisis estructural mediante el programa SAP2000, considerando una carga distribuida de 400 kg/m<sup>2</sup>, además de la carga muerta de la losa, valor correspondiente a la combinación de carga de servicio más crítica conforme a los lineamientos de la ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025). Bajo esta condición, se obtuvo aproximadamente un momento flector máximo de 141 kg·m (Figura 3a). Posteriormente, se determinó la magnitud de la carga concentrada sobre el área de 2 × 2 m necesaria para reproducir el mismo momento flector, resultando una carga equivalente de 750 kg/m<sup>2</sup>, garantizando la equivalencia en términos de sollicitación por flexión (Figura 3b).

La carga se aplicó de forma progresiva en ocho etapas, con incrementos de 100 kg/m<sup>2</sup> hasta alcanzar 700 kg/m<sup>2</sup>, seguido de una etapa final de 50 kg/m<sup>2</sup> para completar la carga total de ensayo. Una vez alcanzado el nivel máximo de carga, esta se mantuvo constante durante un período de 24 horas, con el fin de evaluar el comportamiento diferido de la losa. Posteriormente, se procedió a la descarga gradual del sistema, también en ocho etapas. La Figura 4 ilustra el procedimiento seguido durante la ejecución de la prueba de carga.

Durante el ensayo se registraron las deflexiones máximas, la evolución del comportamiento del elemento bajo carga y la recuperación elástica tras la descarga. Para ello, se utilizó un Datalog 8 Controls, modelo 58-C0239/A, equipado con cuatro sensores de deflexión Gefran, identificados como S1, S2, S3 y S4. Estos sensores fueron dispuestos estratégicamente en el centro y en los puntos medios de los bordes de la losa de 2 × 2 m. Los resultados fueron evaluados considerando criterios de referencia basados en la ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025), incluyendo: (a)

una deflexión máxima absoluta de 0.05 in (1.27 mm); (b) la deflexión máxima admisible en función del claro mayor de la losa ( $L/2000 = 7800/2000 = 3.90$  mm); y (c) una recuperación elástica mínima del 75 % tras la descarga.

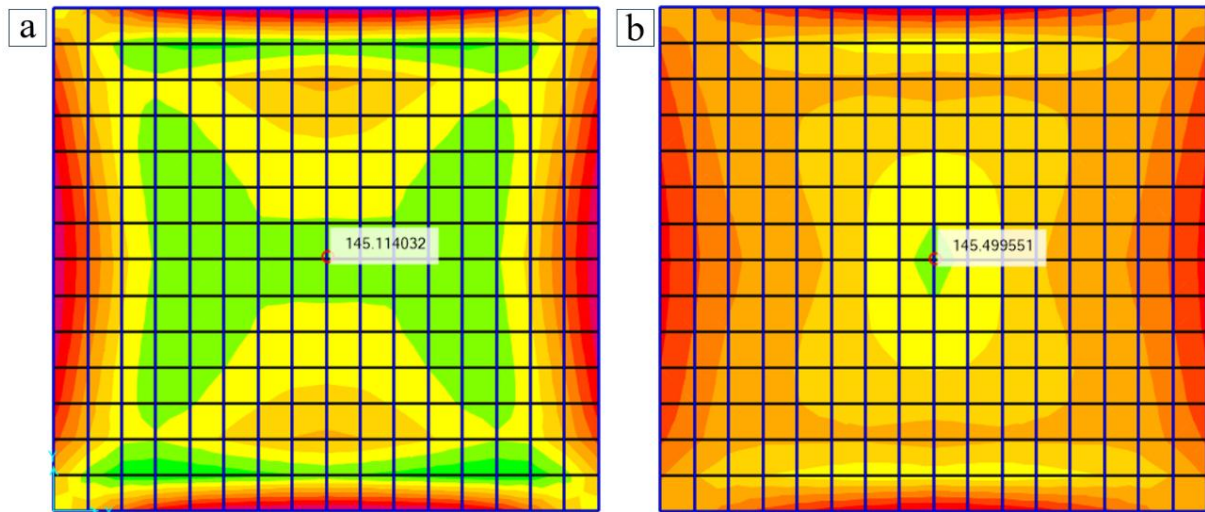


Figura 3. Momento flector máximo: (a) con carga total y (b) con la carga equivalente de 750 kg/m<sup>2</sup> en el centro de 2 × 2 m.

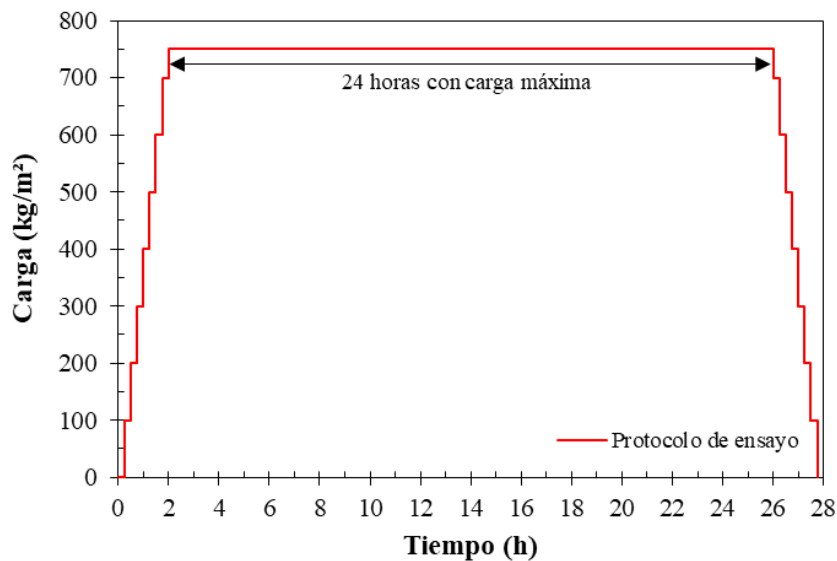


Figura 4. Protocolo de ensayo de carga y descarga.

Si bien la configuración estructural de las losas puede aproximarse a un comportamiento predominantemente unidireccional, la evaluación se realizó utilizando criterios generales de servicio como referencia para la interpretación del comportamiento estructural, adoptando un enfoque conservador. Para la interpretación de los resultados, se estableció una jerarquía de criterios, en la cual el cumplimiento del criterio de recuperación elástica y del límite de deflexión relativa ( $L/2000$ ) se consideran indicadores principales del comportamiento estructural en condiciones de servicio, mientras que la deflexión absoluta se utiliza como criterio complementario. En este sentido, un elemento se considera con comportamiento estructural aceptable cuando cumple los criterios principales, aun cuando pueda presentar desviaciones en el criterio de deflexión absoluta.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Inspección visual

La Figura 5a muestra una vista general de la estructura, evidenciando la exposición directa al ambiente. De manera global, se observa una degradación avanzada del hormigón, caracterizada por la presencia de manchas oscuras asociadas a humedad y depósitos blanquecinos superficiales, lo que indica procesos de lixiviación y eflorescencias (Smith & West, 2021; Nogueira Diniz *et al.*, 2023). Por otro lado, se observan indicios de carbonatación del hormigón junto con procesos avanzados de corrosión de las armaduras. La Figura 5b presenta la losa de la planta alta, donde se observa la ausencia de acabados y de sistemas de protección, así como la superficie expuesta directamente al ambiente. Se identifican irregularidades superficiales, acumulación de suciedad y desagregación del hormigón, condiciones que justificaron la ejecución de la prueba de carga estática.



Figura 5. (a) Vista general y (b) planta alta de la edificación.

La superficie inferior de las losas muestra un deterioro generalizado (Figura 6), caracterizado por la presencia de manchas oscuras, lixiviación y eflorescencias. Adicionalmente se identificaron zonas con irregularidades superficiales y discontinuidades locales, particularmente en áreas próximas a los apoyos y a los nudos viga–columna, donde el deterioro es más pronunciado. Estas manifestaciones patológicas indican una exposición prolongada al ambiente, principalmente a la humedad, así como desprendimiento del recubrimiento, factores que influyen en la calidad del material y en la respuesta mecánica de los elementos estructurales (Krentowski, 2021; Richardson, 2023).



Figura 6. Superficie inferior de: (a) la losa y (b) voladizo.

La Figura 7a presenta el deterioro en los nudos viga–columna, donde se identificaron zonas con pérdida de recubrimiento, fisuración y alteración de la superficie del hormigón. Estos sectores corresponden a áreas críticas del sistema estructural, indicando vulnerabilidad de la edificación en términos de funcionalidad y seguridad. Por otro lado, la Figura 7b muestra la degradación avanzada de los elementos con pérdida del recubrimiento y exposición de armaduras, acompañada de productos de corrosión. Estas manifestaciones confirman los procesos de carbonatación del hormigón y a la prolongada exposición sin protección superficial (Fuhaid & Niaz, 2022; Poursaee & Angst, 2023). En la Figura 7c se observan manchas asociadas a humedad, depósitos superficiales y pérdida local de material, principalmente en zonas cercanas a los apoyos y encuentros con columnas. En general, estas observaciones permiten comprobar un estado de conservación desfavorable de los elementos estructurales, justifican la aplicación de END y la evaluación del desempeño estructural mediante la prueba de carga estática.



Figura 7. (a) Nudo viga–columna, (b) corrosión de armadura y (c) deterioro del hormigón.

Con el fin de sistematizar la información obtenida durante la inspección visual, se elaboró un mapa de daños de la edificación, en el cual se identifican y localizan las principales manifestaciones patológicas observadas (Figura 8). Este mapa permite representar espacialmente la distribución de patologías tales como humedad, eflorescencias, corrosión de armaduras, fisuración y desagregación del hormigón, facilitando la identificación de zonas críticas del sistema estructural. En particular, se observa una mayor concentración de daños en elementos horizontales expuestos y en zonas cercanas a apoyos y nudos viga–columna, lo cual evidencia una relación directa entre las condiciones de exposición ambiental y el deterioro del material. Igualmente, el mapa permitió orientar la selección de los puntos de aplicación de los END y de las losas evaluadas mediante prueba de carga, priorizando aquellas regiones con mayor nivel de afectación.

A partir de la inspección visual, se identificaron principalmente patologías asociadas a pérdida de recubrimiento, humedad, eflorescencias, corrosión de armaduras y procesos de lixiviación, las cuales pueden clasificarse cualitativamente como de severidad moderada a alta, especialmente en zonas de nudos viga–columna y elementos expuestos al ambiente. Estas zonas corresponden a regiones críticas del sistema estructural, donde el deterioro puede comprometer la adherencia acero–hormigón, la transferencia de cargas y la rigidez local de los elementos.

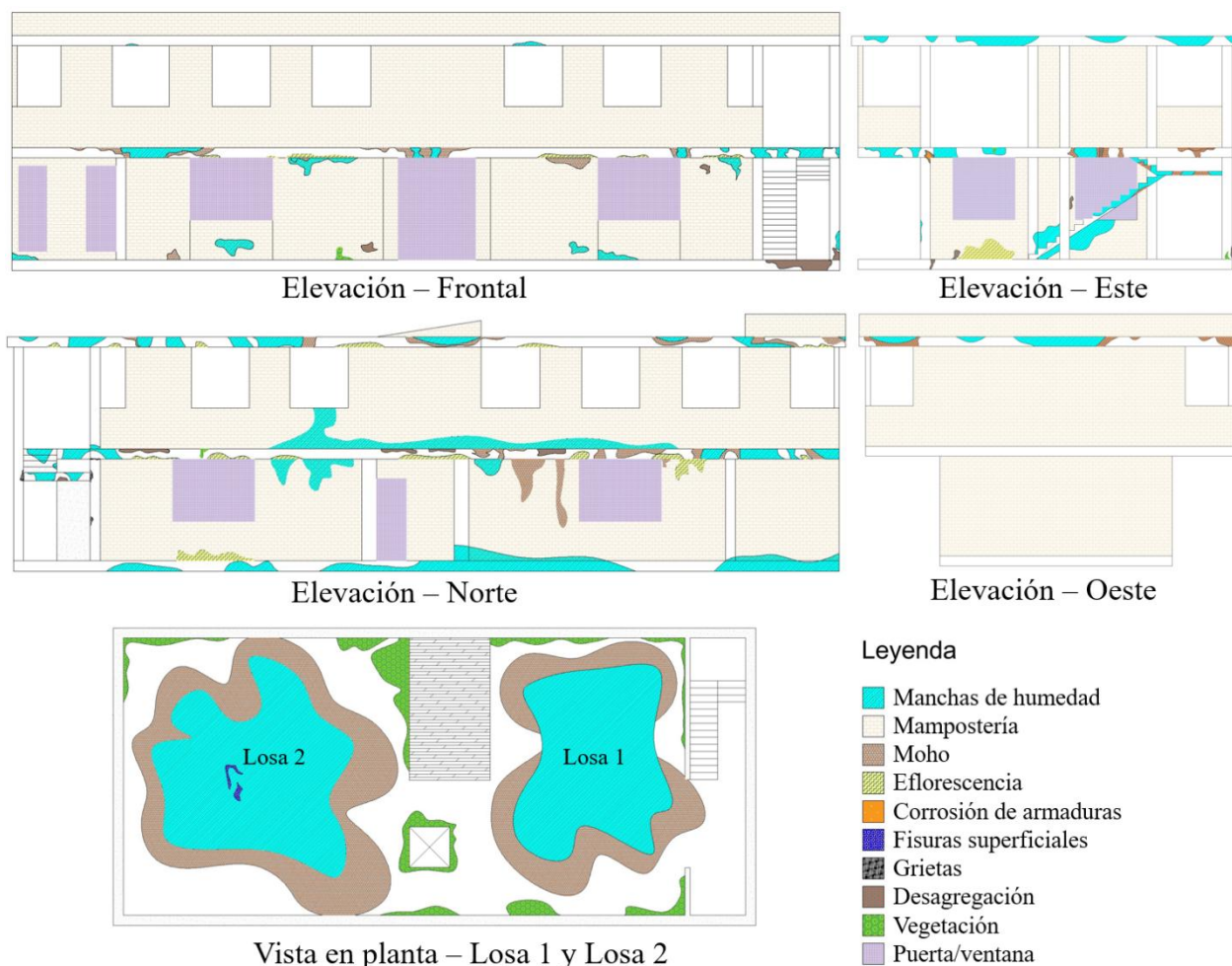


Figura 8. Mapa de daños de la edificación evaluada.

### 3.2 Esclerómetro y VPU

La selección de los elementos estructurales evaluados se realizó mediante un muestreo dirigido, basado en criterios de accesibilidad y evidencia de deterioro identificada durante la inspección visual (Sección 3.1). En particular, se priorizaron aquellos elementos que presentaban manifestaciones patológicas relevantes, con el fin de evaluar condiciones críticas del sistema estructural. El número de puntos de medición y de elementos evaluados se definió considerando las condiciones reales de la edificación y las limitaciones operativas propias del trabajo de campo, buscando un balance entre cobertura del sistema estructural y viabilidad de ejecución. En este sentido, los resultados obtenidos corresponden a una evaluación representativa de zonas críticas, más que a un muestreo estadístico exhaustivo de la totalidad de la estructura.

Los resultados de esclerometría y VPU obtenidos en columnas y vigas se presentan en la Figura 9 y la Figura 10, respectivamente. Los valores RC estimados a partir del NR se muestran junto con las reducciones 30 % (RC-30%) y 40 % (RC-40%), aplicadas a fin de considerar el proceso de carbonatación, descrito en la Sección 2.3.2.

Respecto a las columnas, tanto en planta baja como en planta alta (Figura 9a y Figura 10a), se observa que los valores de RC son superiores a 25 MPa y, en casos particulares, superan los 35 MPa, lo que correspondería a hormigones aptos para fines estructurales (*American Concrete Institute*, 2025). Sin embargo, la presencia de procesos de carbonatación y, consecuentemente, de corrosión en el hormigón armado indica que dichos valores no reflejan necesariamente el estado real del material. La RC fue estimada a partir del ensayo esclerométrico, el cual se ve influenciado por la carbonatación del hormigón (*ASTM International*, 2018). Este fenómeno se asocia a la

formación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en la superficie (Qian *et al.*, 2023), que incrementa localmente la dureza superficial y puede conducir a una sobreestimación superficial de la RC (Kumavat *et al.*, 2021). Adicionalmente, diversos estudios han demostrado que la carbonatación puede generar incrementos aparentes o temporales de la RC en matrices cementicias, asociados a la densificación de la microestructura y al relleno parcial de poros (Lin *et al.*, 2025; Rocha *et al.*, 2025).

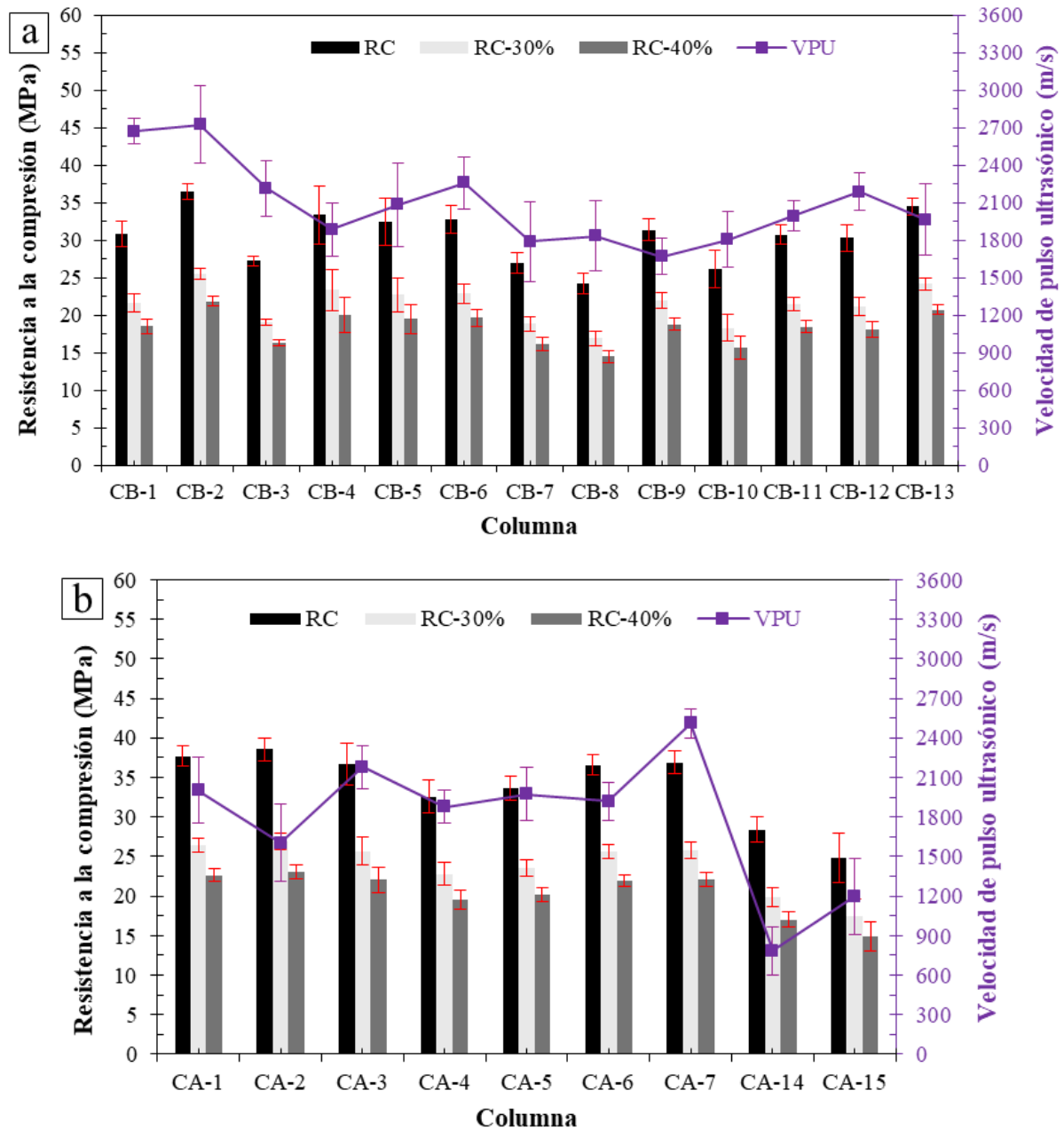
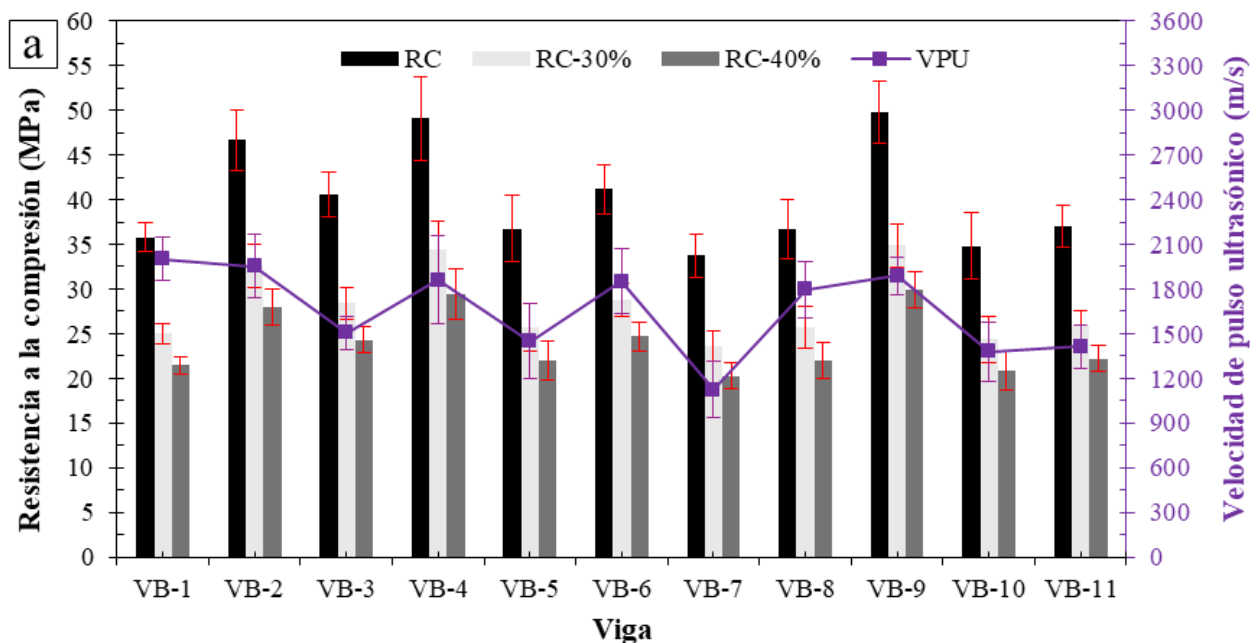


Figura 9. Resultados de esclerómetro y VPU para columnas de: (a) planta baja y (b) planta alta.

En el caso de las vigas (Figura 9b y Figura 10b), el comportamiento es similar al observado en las columnas, con la diferencia de que los valores estimados de RC son mayores. En la mayoría de los casos se registran valores superiores a 35 MPa, e incluso se identifican elementos que superan los 45 y 50 MPa. Si bien estos resultados podrían sugerir una elevada RC, tanto las vigas como las columnas han estado sometidas a un proceso de carbonatación debido a la exposición continua al

ambiente durante aproximadamente 20 años, lo cual, junto con la evidencia de corrosión observada, limita la representatividad de dichos valores para la evaluación del desempeño estructural real. En este sentido, los valores de RC estimados para columnas y vigas fueron ajustados mediante una reducción del orden del 30–40 %, conforme a recomendaciones reportadas en la literatura (Malhotra & Carino, 2003; Breyse, 2012; Kumavat *et al.*, 2021), con el fin de aproximar la resistencia mecánica efectiva del hormigón. Considerando esta reducción, se observa que las columnas alcanzan valores máximos del orden de 25 MPa; mientras que, un número significativo de ellas presenta resistencias inferiores a 20 MPa, lo que sugiere que, en estos casos, el hormigón no podría ser considerado adecuado para fines estructurales (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021; *European Committee for Standardization*, 2021; *American Concrete Institute*, 2025). En el caso de las vigas, si bien se identifican valores extremos que pueden alcanzar aproximadamente 35 MPa, en la mayoría de los casos los valores ajustados se sitúan en el rango de 20 a 25 MPa, indicando que estos elementos podrían cumplir una función estructural. No obstante, los elementos más críticos del sistema corresponden a las columnas, al constituir puntos clave en la transferencia de cargas y en el desempeño global de la estructura, lo que podría comprometer la funcionalidad y seguridad de la edificación (*Fédération internationale du béton*, 2020; *American Concrete Institute*, 2025).

En el caso del ensayo de VPU aplicado a las columnas, se observa una relación proporcional con los valores estimados de RC, de modo que a mayores valores de RC corresponden mayores VPU, lo que evidencia una coherencia general entre ambos métodos de evaluación. No obstante, los valores de VPU se concentran en un rango promedio entre 1750 y 2700 m/s, registrándose además valores puntuales del orden de 1200 y 900 m/s, los cuales corresponden a categorías de hormigón de calidad deficiente a muy deficiente, según criterios reportados en la literatura (Cánovas, 1988; Bungey & Grantham, 2006). Si bien la carbonatación influyó en los resultados del ensayo esclerométrico debido a su carácter superficial, el ensayo de VPU permitió una evaluación más representativa de la calidad interna del hormigón. En este sentido, los resultados evidencian la presencia de discontinuidades, vacíos y posibles defectos internos, asociados principalmente a procesos de corrosión de la armadura y al deterioro de la matriz cementicia (Othman & Ayop, 2021; Aquino Rocha *et al.*, 2025).



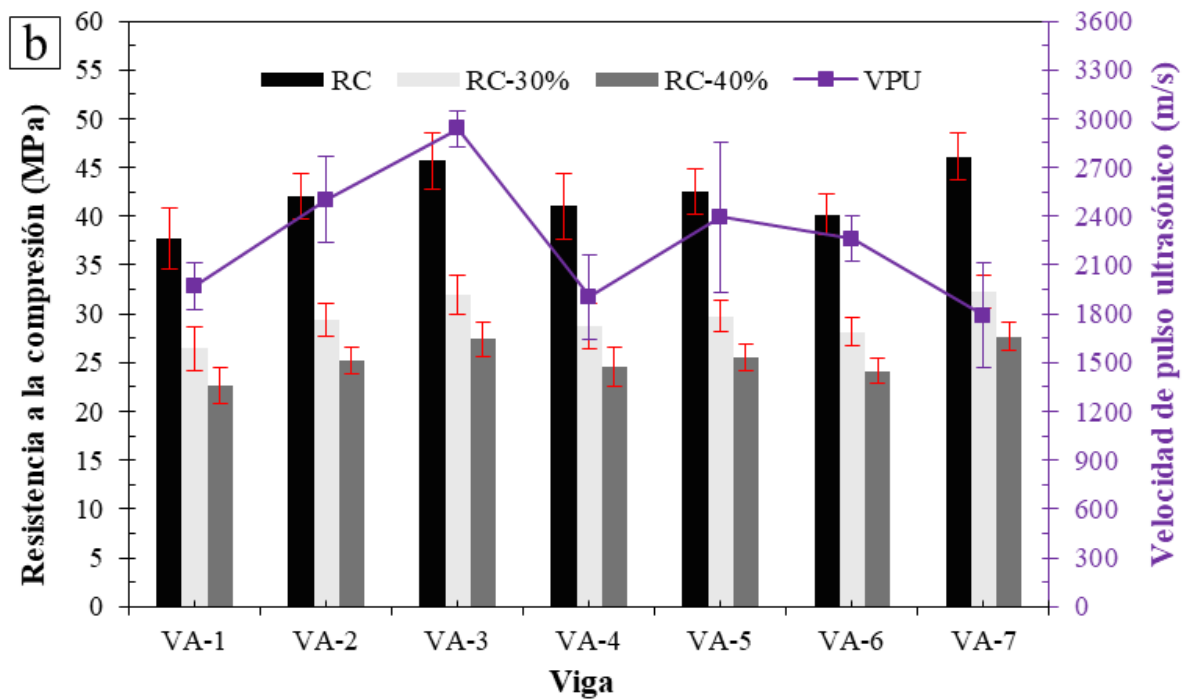


Figura 10. Resultados de esclerómetro y VPU para vigas de: (a) planta baja y (b) planta alta.

En el caso de las vigas, se observa un comportamiento similar al de las columnas. En la planta baja, los valores de VPU son, en general, más bajos, situándose en un rango aproximado entre 1000 y 2100 m/s, mientras que en la planta alta se registran valores superiores, entre 1800 y 3000 m/s. No obstante, la dispersión de los datos evidencia una marcada heterogeneidad del material, indicando que el hormigón no presenta una calidad uniforme ni adecuada. Aunque algunos sectores muestran valores de VPU relativamente mayores, los rangos obtenidos corresponden, en su mayoría, a categorías de calidad regular a muy deficiente (Cánovas, 1988; Bungey & Grantham, 2006). En conjunto, los resultados de VPU y esclerometría sugieren que, si bien la resistencia superficial puede estar sobreestimada debido a efectos de carbonatación, la calidad interna del hormigón se encuentra comprometida, lo que limita el desempeño estructural real de los elementos evaluados. La coherencia entre los resultados obtenidos en distintos puntos, así como su concordancia con la inspección visual, refuerzan la validez de la interpretación adoptada, a pesar de la reducción en la densidad de medición.

### 3.3 Termografía infrarroja

Complementariamente a los ensayos de esclerometría y VPU, se aplicó termografía infrarroja en distintos elementos de la edificación con el objetivo de identificar posibles defectos y anomalías internas. La Figura 11a muestra la imagen digital de un nudo viga–columna, correspondiente al elemento presentado en la Figura 7b, donde se evidencia visualmente corrosión de la armadura y degradación del material. En el termograma (Figura 11b) se identifican anomalías térmicas localizadas, caracterizadas por la presencia de diferentes gradientes térmicos. Estas variaciones no responden a un gradiente térmico uniforme, sino que se concentran en sectores específicos del elemento, coincidentes con las zonas de deterioro observadas en la imagen digital. En particular, el sector identificado como SP3 presenta temperaturas inferiores a las del hormigón circundante, lo que sugiere la posible presencia de delaminación o vacío interno, asociado a un potencial de desprendimiento del recubrimiento (Aquino-Rocha *et al.*, 2024).

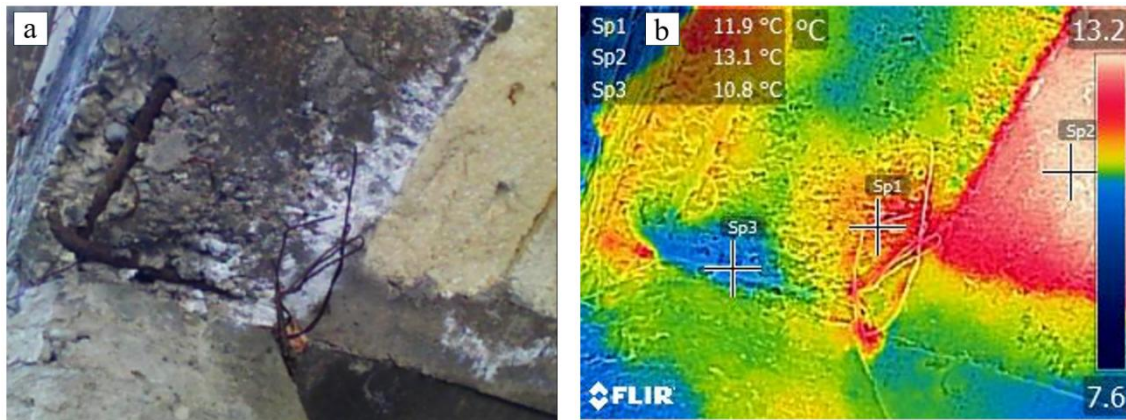


Figura 11. Nudo viga–columna: (a) imagen digital y (b) termograma.

En el caso de las viguetas de la losa (Figura 12a), el termograma correspondiente (Figura 12b) muestra contrastes térmicos diferenciados dentro de un mismo elemento (SP1 y SP2), con una diferencia de temperatura del orden de  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la cual permite la identificación de posibles defectos internos (Rocha *et al.*, 2018). Estas zonas coinciden con áreas donde se observan eflorescencias, pérdida de recubrimiento y signos de lixiviación durante la inspección visual, lo que indica que las variaciones térmicas están asociadas a procesos de degradación interna del hormigón, principalmente vinculados a la presencia de humedad y a la pérdida de compacidad del material (Avdelidis & Moropoulou, 2004).

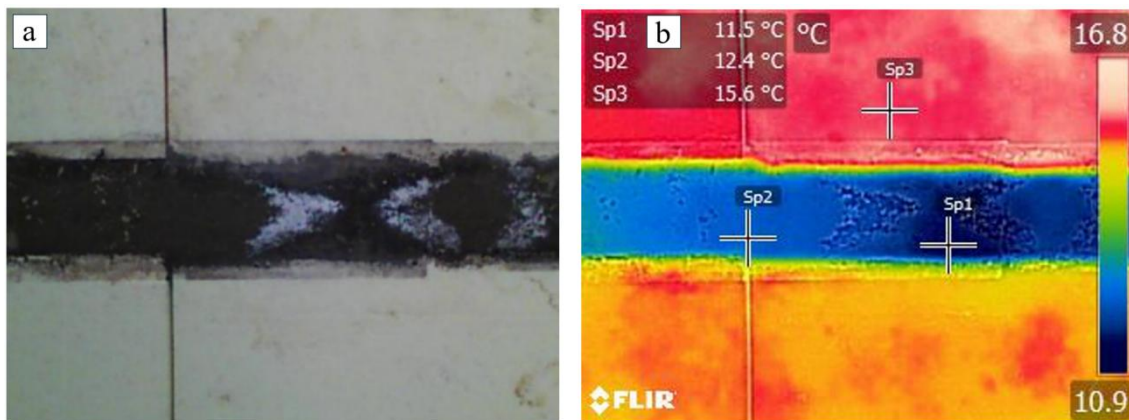


Figura 12. Vigüeta de losa: (a) imagen digital y (b) termograma.

La Figura 13a presenta una imagen digital de la losa, cuyo termograma (Figura 13b) evidencia sectores con temperaturas superficiales superiores respecto a su entorno y la ausencia de uniformidad térmica. Este comportamiento indica la presencia de vacíos y/o delaminaciones, ya que estas zonas, al encontrarse expuestas directamente a la radiación solar, tienden a calentarse más rápidamente que el material intacto, debido a la interrupción de la transferencia de calor, indicando un riesgo de desprendimiento del recubrimiento (Aquino-Rocha *et al.*, 2024; Ibrahim *et al.*, 2026). Un comportamiento similar se observa en la Figura 14a, elemento expuesto directamente a la radiación solar. En este caso, el termograma (Figura 14b) muestra sectores con temperaturas superiores a las del entorno, indicando igualmente la presencia de defectos internos en el elemento.

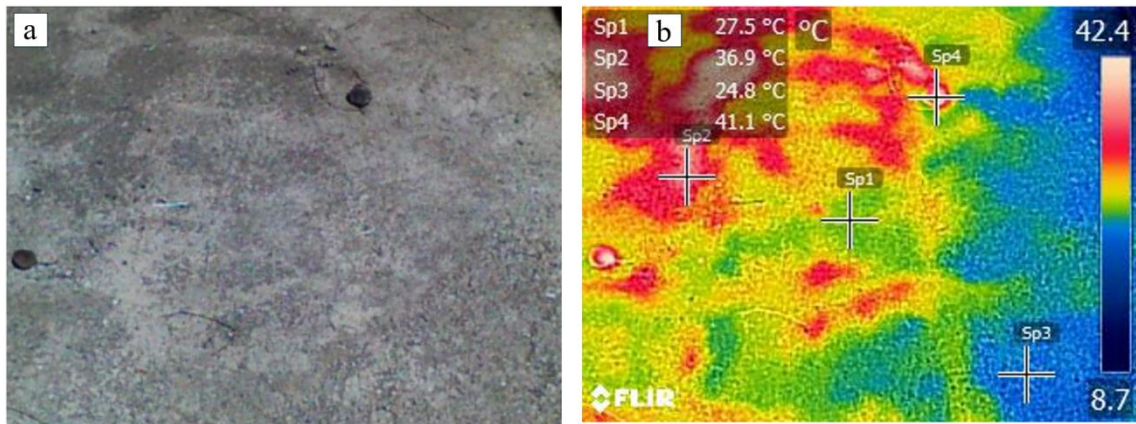


Figura 13. Vigueta de losa: (a) imagen digital y (b) termograma.

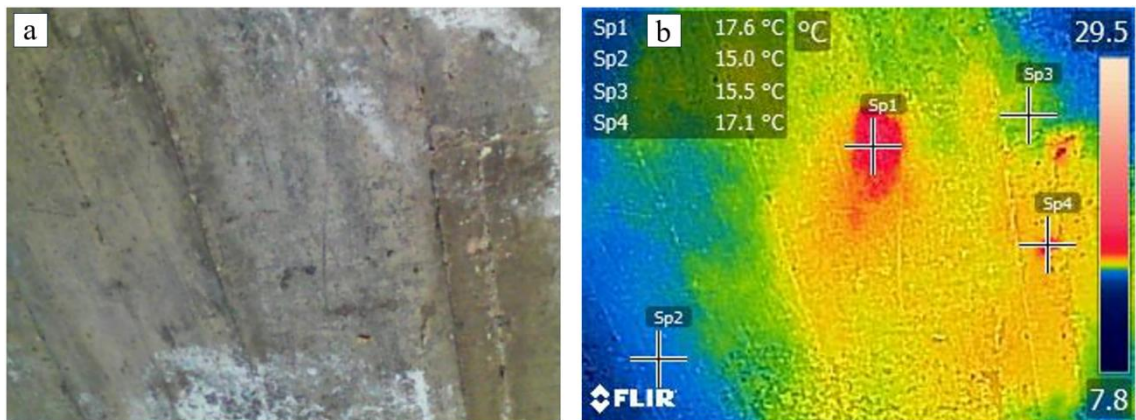


Figura 14. Elemento expuesto: (a) imagen digital y (b) termograma.

Los resultados de la termografía infrarroja deben interpretarse de forma cualitativa, como indicadores de posibles anomalías térmicas asociadas a defectos internos, y no como una evaluación cuantitativa del estado del material. A pesar de la ausencia de condiciones controladas, al tratarse de una técnica pasiva, las anomalías térmicas identificadas muestran coherencia con las zonas de deterioro observadas mediante inspección visual y con los resultados de los END, lo que refuerza la validez de la interpretación adoptada. En conjunto, los resultados de la termografía infrarroja, inspección visual, esclerometría y VPU indican que el deterioro identificado no se limita a la superficie del hormigón, sino que responde a un proceso de degradación interna, evidenciando una heterogeneidad significativa y un compromiso de la integridad del material.

### 3.4 Prueba de carga

Las deflexiones obtenidas durante la prueba de carga estática se presentan en la Tabla 1 para la Losa 1 y la Losa 2, donde el color rojo indica el no cumplimiento de la deflexión máxima admisible de acuerdo con los criterios base de la ACI 318 (*American Concrete Institute, 2025*), conforme detallado en la Sección 2.3.3. Las deflexiones fueron registradas en cada etapa de carga incremental, durante el período de carga sostenida de 24 h, así como durante el proceso de descarga gradual y la recuperación elástica inmediata del sistema. En ambas losas, las deflexiones aumentaron de manera continua y progresiva a medida que la carga se incrementó hasta alcanzar la carga total de ensayo de 750 kg/m<sup>2</sup> (100 %). La Figura 15 y Figura 16 muestran la evolución temporal completa de las deflexiones medidas para la Losa 1 y la Losa 2, respectivamente, incluyendo las fases de carga, carga sostenida y descarga.

Durante el período de carga sostenida de 24 h se registró un incremento adicional de las deflexiones, atribuido al comportamiento diferido del sistema. Este efecto fue más pronunciado en

la Losa 2, lo que evidencia una mayor sensibilidad a la carga y una menor rigidez global del elemento. Tras la descarga gradual, se observó una recuperación parcial de las deflexiones, lo que permitió cuantificar la deflexión residual instantánea y el grado de comportamiento elástico de cada losa. Los porcentajes de recuperación y el cumplimiento de los criterios basados en la norma ACI 318 (*American Concrete Institute, 2025*) se resumen en la Tabla 2, donde el color verde indica cumplimiento y el color rojo indica incumplimiento.

En la Losa 1, las deflexiones máximas registradas se situaron entre 2.016 mm y 2.381 mm. Si bien estos valores superan el criterio absoluto de deflexión de 0.05 in ( $\leq 1.27$  mm), cumplen con el criterio de deflexión máxima en función del claro efectivo de la losa ( $\leq 3.90$  mm). Igualmente, la recuperación elástica fue superior al 75 % en todos los sensores, lo que indica un comportamiento predominantemente elástico, con deformaciones residuales reducidas y una respuesta estructural estable bajo la carga de ensayo. Por el contrario, la Losa 2 presentó un comportamiento desfavorable. Las deflexiones máximas alcanzaron valores comprendidos entre 3.828 mm y 4.983 mm, superando tanto el límite absoluto de deflexión ( $\leq 1.27$  mm) como el criterio asociado al claro efectivo de la losa ( $\leq 3.90$  mm) en todos los sensores. En cuanto a la recuperación elástica, únicamente los sensores S1 y S2 cumplieron el criterio del 75 %; mientras que, los sensores S3 y S4 presentaron recuperaciones inferiores, evidenciando deformaciones residuales más significativas y un comportamiento parcialmente inelástico. Con base en estos criterios, la Losa 1 presenta un comportamiento estructural aceptable en condiciones de servicio, mientras que la Losa 2 no cumple los criterios principales, evidenciando un desempeño estructural desfavorable.

Tabla 1. Deflexiones registradas durante la prueba de carga estática.

Etapa de carga	Carga aplicada acumulada (kg/m <sup>2</sup> )	Losa 1 - Deflexión (mm)				Losa 2 - Deflexión (mm)			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga 1 (13.33%)	100	0.131	0.238	0.180	0.230	0.369	0.274	0.430	0.420
Carga 2 (26.67%)	200	0.336	0.516	0.380	0.510	0.559	0.747	0.830	0.810
Carga 3 (40.00%)	300	0.559	0.725	0.580	0.730	0.929	1.147	1.290	1.260
Carga 4 (53.33%)	400	0.680	0.874	0.700	0.900	1.314	1.574	1.820	1.780
Carga 5 (66.67%)	500	0.880	1.129	0.910	1.170	1.667	2.037	2.330	2.300
Carga 6 (80.00%)	600	1.104	1.375	1.080	1.430	2.031	2.531	2.870	2.850
Carga 7 (93.33%)	700	1.313	1.633	1.300	1.700	2.395	3.012	3.400	3.390
Carga 8 (100.00%)	750	1.378	1.174	1.410	1.820	2.631	3.325	3.750	3.740
En 24 horas	750	1.907	2.205	1.920	2.240	2.928	3.886	4.300	4.260
Descarga 1 (93.33%)	700	1.828	2.114	1.830	2.150	2.812	3.687	4.140	4.090
Descarga 2 (80.00%)	600	1.634	1.888	1.610	1.920	2.547	3.337	3.780	3.730
Descarga 3 (66.67%)	500	1.391	1.633	1.430	1.680	2.272	2.874	3.340	3.330
Descarga 4 (53.33%)	400	1.097	1.318	1.230	1.400	2.062	2.413	2.970	2.960
Descarga 5 (40.00%)	300	0.817	1.054	0.960	1.110	1.694	2.120	2.540	2.550
Descarga 6 (26.67%)	200	0.537	0.731	0.700	0.790	1.361	1.766	2.110	2.120
Descarga 7 (13.33%)	100	0.292	0.466	0.420	0.520	1.097	1.350	1.680	1.700
Descarga 8 (Final)	0	0.192	0.375	0.340	0.440	0.717	1.046	1.250	1.280
Máximo durante el ensayo		2.077	2.357	2.016	2.381	3.828	4.565	4.983	4.907

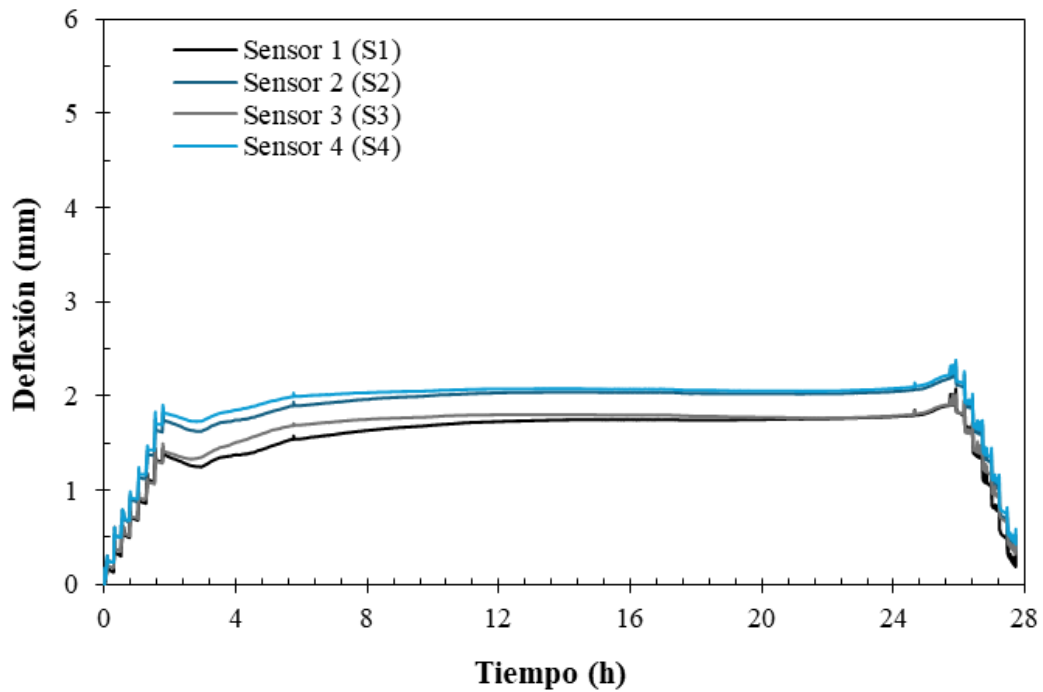


Figura 15. Evolución temporal de deflexión para la Losa 1.

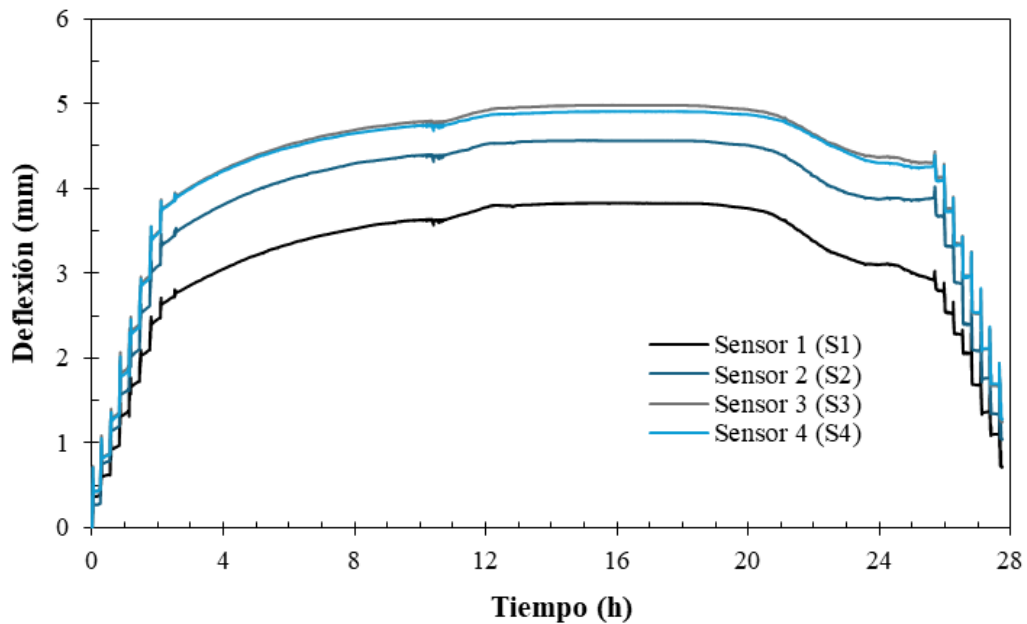


Figura 16. Evolución temporal de deflexión para la Losa 2.

Tabla 2. Criterios de aceptación.

Sensor	Losa 1			Losa 2		
	Recuperación (%)	Deflexión máxima		Recuperación (%)	Deflexión máxima	
		≤ 1.27 mm	≤ 3.90 mm		≤ 1.27 mm	≤ 3.90 mm
S1	90.76	No cumple	Cumple	81.27	No cumple	No cumple
S2	84.90	No cumple	Cumple	77.53	No cumple	No cumple
S3	83.13	No cumple	Cumple	74.91	No cumple	No cumple
S4	81.52	No cumple	Cumple	73.91	No cumple	No cumple

Durante la ejecución del ensayo no se detectó fisuración visible adicional en ninguna de las losas, ni durante las etapas de carga incremental, ni durante el período de carga sostenida, ni durante la descarga. No obstante, la presencia de procesos previos de fisuración y lixiviación limitó la identificación visual de fisuras inducidas exclusivamente por la prueba, sin que ello descarte la posible existencia de microfisuración o daño interno no observable superficialmente. En términos generales, la Losa 1 mostró un comportamiento estable y controlado, con una respuesta progresiva frente a los incrementos de carga y una adecuada recuperación elástica, aunque no cumple el criterio de deflexión máxima absoluta. En contraste, la Losa 2 presentó deflexiones excesivas, recuperación elástica insuficiente en parte del área evaluada y una mayor sensibilidad al efecto de carga sostenida, por lo que no cumple los criterios de aceptación en estado de servicio, siguiendo como base la ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025).

La complementariedad de resultados de la inspección visual, esclerómetro, VPU, termografía infrarroja y la prueba de carga estática permitió establecer una evaluación global del estado estructural de la edificación. La inspección visual y la termografía infrarroja evidenciaron zonas con deterioro superficial, anomalías térmicas y defectos internos asociados a humedad, lixiviación y corrosión, en concordancia con los valores reducidos de VPU registrados, que indican pérdida de calidad y homogeneidad interna del hormigón. Del mismo modo, la prueba de carga estática demostró que, aunque algunos elementos presentan una respuesta estable bajo solicitaciones controladas, otros exhiben deflexiones excesivas y recuperaciones elásticas insuficientes, reflejando una disminución del desempeño en estado de servicio.

#### 4. DISCUSIÓN

Las observaciones realizadas mediante inspección visual y el mapa de daños fueron consistentes con los resultados obtenidos mediante END y prueba de carga, evidenciando que el deterioro identificado no es únicamente superficial, sino que afecta el comportamiento estructural de la edificación. De manera general, los resultados de esclerometría y VPU evidencian una variabilidad significativa en la calidad del material, así como valores indicativos de resistencia reducida en varias zonas evaluadas, lo cual es coherente con las manifestaciones de deterioro observadas durante la inspección visual. Los valores de VPU sugieren la presencia de heterogeneidad interna y posibles defectos en el hormigón, lo que puede influir en el comportamiento mecánico de los elementos estructurales. Por tanto, la coherencia entre la distribución espacial del deterioro, la baja calidad del material identificada mediante END y el comportamiento estructural observado en la prueba de carga permite establecer una interpretación global del estado de la estructura.

Si bien los END no permiten obtener de forma directa parámetros estructurales como la resistencia efectiva de diseño o el módulo de elasticidad, los resultados obtenidos proporcionan información relevante sobre la calidad del material y su estado de degradación. En este sentido, los valores reducidos de VPU, la dispersión de los resultados y la posible sobreestimación de la resistencia superficial identificada mediante esclerometría permiten inferir una pérdida de homogeneidad y una disminución de las propiedades mecánicas del hormigón. Estas condiciones se reflejan en el comportamiento estructural observado, particularmente en la Losa 2, donde se presentan deflexiones excesivas y una menor rigidez global, lo cual es coherente con una posible degradación mecánica del material. Por tanto, los resultados de los END se interpretan como indicadores cualitativos del estado estructural del material, más que como parámetros directos de diseño.

La aplicación diferenciada de los END y la prueba de carga responde a las condiciones reales de evaluación de estructuras existentes. Los END fueron aplicados en elementos primarios del sistema resistente, como vigas y columnas, con el objetivo de caracterizar la calidad del material y detectar posibles defectos internos, mientras que la prueba de carga se ejecutó en losas, donde es técnicamente viable evaluar la respuesta estructural directa bajo condiciones de servicio. En este contexto, la prueba de carga no tiene como finalidad validar de manera directa la capacidad

resistente de los elementos evaluados mediante END, sino proporcionar información sobre el comportamiento estructural global del sistema. En este sentido, el enfoque adoptado se basa en la complementariedad de escalas de evaluación (material–elemento–sistema), más que en una validación directa entre técnicas aplicadas en un mismo elemento estructural.

Debido a la ausencia de información estructural detallada y a la incertidumbre asociada a la configuración real del sistema resistente, los criterios normativos de la ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025) fueron utilizados como referencia para la interpretación del comportamiento observado, más que como una verificación estricta de diseño. Por tanto, los límites de deflexión y los criterios de servicio permiten identificar tendencias de comportamiento estructural y posibles deficiencias en condiciones de servicio, adoptando un enfoque conservador en la evaluación. Se reconoce como limitación la incertidumbre respecto al modelo estructural exacto de las losas evaluadas, lo cual puede influir en la interpretación precisa de los criterios normativos aplicados.

La elaboración de un modelo estructural global no fue considerada en el presente estudio debido al alto nivel de incertidumbre asociado a la edificación evaluada, la cual no dispone de planos estructurales, memoria de cálculo ni información confiable sobre propiedades del material y condiciones de fundación. En este contexto, la construcción de un modelo numérico implicaría la adopción de múltiples supuestos, lo que podría conducir a una representación poco confiable del comportamiento estructural real. Por esta razón, el enfoque adoptado prioriza la evaluación experimental in situ, mediante la integración de inspección visual, END y prueba de carga, lo cual permite obtener información directa del comportamiento estructural bajo condiciones reales de servicio. En estructuras existentes con información incompleta, los modelos numéricos pueden introducir más incertidumbre que certeza si no están adecuadamente calibrados.

La interpretación conjunta de los resultados permite establecer una evaluación global del estado estructural de la edificación. Si bien algunos elementos presentan un comportamiento aceptable bajo condiciones de carga controlada, la presencia de deterioro avanzado, heterogeneidad del material y el incumplimiento de criterios de servicio en determinados elementos evidencian que la estructura no presenta un desempeño uniforme ni plenamente confiable. En particular, mientras que la Losa 1 mostró un comportamiento estructural estable bajo condiciones de carga de servicio, la Losa 2 no cumplió los criterios de aceptación establecidos, evidenciando deflexiones excesivas y una recuperación elástica insuficiente. Aunque no existe coincidencia espacial directa entre todas las técnicas aplicadas, la integración de resultados se realiza a nivel global del sistema estructural, permitiendo una interpretación coherente del estado general de la estructura.

Con base en el marco de decisión propuesto en la metodología, la evaluación estructural permite clasificar el comportamiento de la edificación en diferentes niveles de aptitud. En este sentido, la Losa 1 puede considerarse apta con restricciones, ya que presenta un comportamiento estable bajo condiciones de carga de servicio, aunque en un contexto de material heterogéneo y deterioro superficial. Por otro lado, la Losa 2 se clasifica como no apta, debido al incumplimiento de los criterios de servicio, evidenciado por deflexiones excesivas y una recuperación elástica insuficiente. A nivel global, la edificación presenta un comportamiento no uniforme y una condición estructural comprometida, asociada a deterioro avanzado, heterogeneidad del material y presencia de defectos internos identificados mediante END. Desde el punto de vista ingenieril, se requiere la implementación de medidas de intervención, tales como una evaluación estructural más detallada, refuerzo localizado o rehabilitación, antes de considerar la edificación apta para su uso. Finalmente, el presente estudio presenta algunas limitaciones inherentes a la evaluación de estructuras existentes con información incompleta. En primer lugar, no se realizaron ensayos destructivos mediante extracción de núcleos, lo cual limita la estimación precisa de la resistencia real del hormigón y la calibración de los resultados obtenidos mediante END. Igualmente, la ausencia de planos estructurales y memoria de cálculo introduce incertidumbre respecto a la configuración del sistema resistente, las condiciones de apoyo y las rutas reales de carga, lo que

restringe la posibilidad de desarrollar un modelo estructural confiable. Por otra parte, los resultados obtenidos mediante END deben interpretarse como estimaciones indicativas de la calidad del material, estando sujetos a factores como la carbonatación, la humedad y la heterogeneidad del hormigón. La selección de los elementos evaluados responde a criterios de accesibilidad y evidencia de deterioro, por lo que la representatividad de los resultados puede no reflejar completamente el comportamiento de la totalidad de la estructura. No obstante, la integración de los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas permite establecer una evaluación coherente del estado estructural global de la edificación.

## 5. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la aptitud estructural de una edificación existente de hormigón armado mediante la aplicación complementaria de inspección visual, ensayos no destructivos (esclerometría, velocidad de pulso ultrasónico y termografía infrarroja) y prueba de carga estática. A partir de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La inspección visual evidenció un estado de conservación desfavorable de la estructura, caracterizado por pérdida de recubrimiento, presencia de humedad, corrosión de armaduras, eflorescencias y procesos de lixiviación, lo cual permitió identificar zonas críticas del sistema estructural.
- Los resultados de esclerometría y VPU evidenciaron una marcada heterogeneidad del material y valores indicativos de resistencia reducida. La esclerometría puede sobreestimar la resistencia superficial debido a efectos de carbonatación, mientras que la VPU permitió identificar posibles defectos internos, en concordancia con las observaciones de campo.
- La termografía infrarroja permitió identificar anomalías térmicas asociadas a humedad interna, vacíos y posibles delaminaciones, confirmando que el deterioro no se limita a la superficie del hormigón.
- La prueba de carga estática evidenció un comportamiento estructural diferenciado entre los elementos evaluados: la Losa 1 mostró una respuesta estable bajo condiciones de servicio, mientras que la Losa 2 no cumplió los criterios de referencia, presentando deflexiones excesivas y recuperación elástica insuficiente.
- La integración de los resultados obtenidos mediante inspección visual, END y prueba de carga permitió establecer un diagnóstico estructural global coherente, evidenciando que el deterioro identificado afecta tanto la calidad del material como el desempeño estructural de la edificación.

En términos del marco de decisión adoptado, la estructura evaluada presenta un comportamiento no uniforme y una condición estructural desfavorable, caracterizada por deterioro avanzado, heterogeneidad del material y deficiencias en el desempeño en servicio de algunos elementos. En este contexto, la edificación se clasifica globalmente entre apta con restricciones y no apta, por lo que no puede considerarse plenamente apta para su uso en su estado actual. Por tanto, se recomienda la realización de una evaluación estructural más detallada, así como la implementación de medidas de intervención, tales como refuerzo estructural o rehabilitación de los elementos comprometidos, antes de su puesta en servicio. Finalmente, el enfoque metodológico adoptado demuestra que la integración de técnicas de evaluación permite no solo caracterizar el estado del material, sino también establecer criterios de decisión técnica en contextos de alta incertidumbre, como es el caso de edificaciones existentes sin información de diseño.

## 6. REFERENCIAS

- Abdollahi-Mamoudan, F., Ibarra-Castanedo, C. and Maldague, X. P. (2025), *Non-destructive testing and evaluation of hybrid and advanced structures: A comprehensive review of methods, applications, and emerging trends*. Sensors. 25(12):3635. <https://doi.org/10.3390/s25123635>
- Abedin, M., Basalo, F. J. D. C., Kiani, N., Mehrabi, A. B. and Nanni, A. (2022), *Bridge load testing and damage evaluation using model updating method*. Engineering Structures. 252:113648. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113648>
- Ali-Benyahia, K., Kenai, S., Ghrici, M., Sbartai, Z. M. and Elachachi, S. M. (2023), *Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods*. Construction and Building Materials. 366:130161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130161>
- Alqurashi, I., Alver, N., Bagci, U. and Catbas, F. N. (2025), *A review of ultrasonic testing and evaluation methods with applications in civil NDT/E*. Journal of Nondestructive Evaluation. 44(2):53. <https://doi.org/10.1007/s10921-025-01190-0>
- American Concrete Institute. (2025), *ACI CODE-318-25: Building Code for Structural Concrete — Code Requirements and Commentary*. American Concrete Institute.
- Aquino Rocha, J. H., Murillo Borda, W., Herrera Rosas, M. and Cayo Chileno, N. G. (2025), *Comparative Evaluation of Grids for the Detection of Internal Defects in Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity: Experimental Approach*. Journal of Structural Design and Construction Practice. 30(4):04025074. <https://doi.org/10.1061/JSDCCC.SCENG-1791>
- Aquino-Rocha, J. H., Póvoas, Y. V. and Bezerra-Batista, P. I. (2024), *Flaw recognition in reinforced concrete bridges using infrared thermography: A case study*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (110):99-109. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20230521>
- ASTM International. (2016), *ASTM C597/C597M-16: Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0597\\_C0597M-16](https://doi.org/10.1520/C0597_C0597M-16)
- ASTM International. (2018), *ASTM C805/C805M-18: Standard test method for rebound number of hardened concrete*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0805\\_C0805M-18](https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18)
- Avdelidis, N. P. and Moropoulou, A. (2004), *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*. Journal of Cultural Heritage. 5(1):119-127. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.07.002>
- Boccacci, G., Frasca, F., Bertolin, C. and Siani, A. M. (2024), *Diagnosis of historic reinforced concrete buildings: a literature review of non-destructive testing (NDT) techniques*. Procedia Structural Integrity. 55:160-167. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.021>
- Bortolini, R. and Forcada, N. (2018), *Building inspection system for evaluating the technical performance of existing buildings*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 32(5):04018073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001220)
- Breyse, D. (2012), *Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods*. Construction and Building Materials. 33:139-163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>
- Bungey, J. H. and Grantham, M. G. (2006), *Testing of concrete in structures*. CRC Press.
- Cánovas, M. F. (1988), *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Ed. Dossat.
- De Domenico, D., Messina, D. and Recupero, A. (2022), *Quality control and safety assessment of prestressed concrete bridge decks through combined field tests and numerical simulation*. Structures. 39:1135-1157. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.086>
- Diaferio, M. and Varona, F. B. (2024), *Concrete structures: latest advances and prospects for a sustainable future*. Applied Sciences. 14(9):3803. <https://doi.org/10.3390/app14093803>
- European Committee for Standardization. (2021), *EN 206:2013+A2: Concrete — Specification, performance, production and conformity*. CEN.
- Fédération internationale du béton. (2020), *fib Bulletin 90: Visual inspection of concrete structures*. Evaluación estructural de una edificación existente de hormigón armado mediante un enfoque complementario de inspección visual, ensayos no destructivos y prueba de carga.
- Peredo Villarroel, J. G., Rojas Quispe, C. D., Lafuente Fernandez, J., Ticona Martinez, J., Callao Corrales, ...

fib.

- Fuhaid, A. F. A. and Niaz, A. (2022), *Carbonation and corrosion problems in reinforced concrete structures*. Buildings. 12(5):586. <https://doi.org/10.3390/buildings12050586>
- Ghosn, M., Frangopol, D. M., McAllister, T. P., Shah, M., Diniz, S. M. C., Ellingwood, B. R. and Zhao, X. L. (2016), *Reliability-based performance indicators for structural members*. Journal of Structural Engineering. 142(9):F4016002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001546)
- Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R. and Singari, R. M. (2022), *Advances in applications of non-destructive testing (NDT): A review*. Advances in Materials and Processing Technologies. 8(2):2286-2307. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>
- Harris, S. Y. (2001), *Building pathology: deterioration, diagnostics, and intervention*. John Wiley & Sons.
- Ibrahim, A., Faris, N., Zayed, T., Qureshi, A. H., Abdelkhalik, S. and Abdelkader, E. M. (2026), *Application of infrared thermography in concrete bridge deck inspection: current practices, challenges and future needs*. Nondestructive Testing and Evaluation. 41(1):1-44. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2443810>
- Ichi, E. and Dorafshan, S. (2022), *Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks*. Automation in Construction. 142:104523. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104523>
- Krentowski, J. R. (2021), *Assessment of destructive impact of different factors on concrete structures durability*. Materials. 15(1):225. <https://doi.org/10.3390/ma15010225>
- Krentowski, J. R., Knyziak, P., Pawłowicz, J. A. and Gavardashvili, G. (2023), *Historical masonry buildings' condition assessment by non-destructive and destructive testing*. Engineering Failure Analysis. 146:107122. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107122>
- Kumavat, H. R., Chandak, N. R. and Patil, I. T. (2021), *Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review*. Case Studies in Construction Materials. 14:e00491. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00491>
- Lin, L., Xie, M., Li, X., Zheng, K., Wang, J., Yu, K. and Bai, Y. (2025), *Carbonation of cement-based materials under different conditions: From multi-characterizations to mechanism exploration*. Construction and Building Materials. 491:142764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142764>
- Malhotra, V. M. and Carino, N. J. (2003), *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2021), *Código Estructural*. Gobierno de España.
- Nogueira Diniz, J. D. C., Paiva, A. C. D., Junior, G. B., de Almeida, J. D. S., Silva, A. C., Cunha, A. M. T. D. S. and Cunha, S. C. A. P. D. S. (2023), *A method for detecting pathologies in concrete structures using deep neural networks*. Applied Sciences. 13(9):5763. <https://doi.org/10.3390/app13095763>
- Olaszek, P., Łagoda, M. and Casas, J. R. (2014), *Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application*. Structure and Infrastructure Engineering. 10(6):834-842. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.772212>
- Othman, F. Z. and Ayop, S. S. (2021), *Evaluation of corrosion in reinforced concrete: A review on the application of UPV method*. Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment. 2(1):160-170.
- Poursaee, A. and Angst, U. M. (2023), *Principles of corrosion of steel in concrete structures*. In: *Corrosion of steel in concrete structures*. Woodhead Publishing. 17-34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821840-2.00004-3>
- Qian, R., Li, Q., Fu, C., Zhang, Y., Wang, Y., Jin, N. and Jin, X. (2023), *Investigations on atmospheric carbonation corrosion of concrete structure beam exposed to real marine-*

- environment for 7 years.* Journal of Building Engineering. 71:106517. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106517>
- Richardson, M. G. (2023), *Fundamentals of durable reinforced concrete*. CRC Press.
- Rocha, J. H. A., Chileno, N. G. C. and Toledo Filho, R. D. (2025), *Mechanical and durability performance of mortars with Portland cement, recycled concrete powder, and metakaolin under accelerated carbonation conditions.* Powder Technology. 453:120616. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120616>
- Rocha, J. H. A., Santos, C. F. D., Oliveira, J. B. D., Albuquerque, L. K. D. S. and 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>
- Rocha, J. H. A., Silva, M., Póvoas, Y. and Monteiro, E. (2017), *Análise da profundidade de fissuras em concreto com termografia infravermelha.* Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. 2(3). <https://doi.org/10.25286/repa.v2i3.688>
- Smith, M. and West, B. N. (2021), *Building pathology.* In: *Building Surveyor's Pocket Book.* Routledge. 89-133.
- Watt, D. S. (2025), *Building pathology: Principles and practice.* John Wiley & Sons.