








## 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.

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 Contato: [j.aquino@umss.edu.bo](mailto:j.aquino@umss.edu.bo)

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

Recebido: 19/01/2026 | Correções recebidas: 08/04/2026 | Aceito: 11/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

### 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.

**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), “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.” 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.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, todos os autores (J.G. Peredo Villarroel, C.D. Rojas Quispe, J. Lafuente Fernandez, J. Ticona Martinez, H.N. Callao Corrales, R. Solis e J.H.A. Rocha) participaram de forma equitativa nas diferentes etapas do estudo, incluindo a conceitualização, execução experimental, coleta e análise de dados, bem como na redação e revisão do manuscrito, com uma contribuição estimada de 14,3% por autor.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

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

### **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.

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

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

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

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

## 1. INTRODUÇÃO

A avaliação do estado estrutural de edificações existentes de concreto armado constitui um desafio atual na engenharia civil, particularmente em estruturas expostas a condições ambientais agressivas por longos períodos e naquelas em que as informações do projeto estrutural original são incompletas ou inexistentes. Essa condição aumenta a incerteza associada à determinação das propriedades mecânicas do material e do comportamento estrutural, dificultando a tomada de decisões quanto à segurança e ao desempenho em serviço (Bungey & Grantham, 2006; Bortolini & Forcada, 2018). Nesse contexto, torna-se necessário garantir uma análise adequada da estrutura sem intervenções destrutivas, o que implica a revisão dos enfoques tradicionais de avaliação, bem como a adoção de metodologias integradas e atualizadas, capazes de gerar informações consistentes e confiáveis sobre estruturas existentes e deterioradas (De Domenico *et al.*, 2022; Diaferio & Varona, 2024; Watt, 2025).

Na prática profissional, a avaliação estrutural de edificações existentes baseia-se na interpretação de resultados obtidos por meio de ensaios indiretos, especialmente ensaios não destrutivos (END), complementados pelo julgamento técnico do inspetor ou avaliador responsável (Ghosn *et al.*, 2016). Entre os END mais utilizados destacam-se a inspeção visual, o georradar (GPR), a esclerometria, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU), a termografia infravermelha e a resistividade elétrica do concreto. Esses métodos caracterizam-se por serem não invasivos, de rápida aplicação e por permitirem uma avaliação preliminar do estado do concreto e das armaduras, fornecendo informações sobre a qualidade do material, a presença de heterogeneidades ou descontinuidades internas, bem como sobre as condições de durabilidade e o potencial risco de corrosão das armaduras (Ali-Benyahia *et al.*, 2023; Krentowski *et al.*, 2023; Boccacci *et al.*, 2024). Em conjunto, essas técnicas permitem identificar zonas deterioradas, variações de compactidade e presença de umidade, fornecendo informações relevantes para o diagnóstico estrutural e a tomada de decisões técnicas (Gupta *et al.*, 2022; Alqurashi *et al.*, 2022).

No entanto, apesar de sua ampla difusão, os END apresentam diversas limitações, uma vez que se tratam de métodos indiretos sensíveis a fatores como a carbonatação, o teor de umidade, a condição superficial do concreto e sua heterogeneidade. Essas influências podem conduzir à superestimação ou subestimação das propriedades mecânicas, especialmente em estruturas antigas e com deterioração avançada, comprometendo a confiabilidade dos END como ferramentas únicas de apoio à tomada de decisões relacionadas à reparação e/ou ao reforço estrutural (Malhotra & Carino, 2003; Abdollahi-Mamoudan *et al.*, 2025).

Por outro lado, a prova de carga constitui uma ferramenta experimental direta para a avaliação do comportamento de estruturas existentes, uma vez que permite verificar a resposta global da edificação sob condições controladas de serviço, por meio da medição de deflexões, deformações residuais e recuperação elástica (American Concrete Institute, 2025). Entre as diversas normas que podem ser utilizadas para a realização da prova de carga, a ACI 318 (American Concrete Institute, 2025) fornece um referencial objetivo para avaliar se o comportamento observado é compatível com um desempenho estrutural seguro. No entanto, a aplicação de provas de carga é, em geral, conduzida como um procedimento independente, sem a devida complementaridade com os resultados obtidos por outros ensaios, como os END.

A literatura científica e técnica apresenta uma disponibilidade limitada de abordagens metodológicas complementares que permitam relacionar diretamente os resultados obtidos por meio de END com o comportamento estrutural observado durante provas de carga (Olaszek *et al.*, 2014; Abedin *et al.*, 2022). Essa lacuna reduz a aplicabilidade técnica dos END no processo de avaliação de estruturas existentes, particularmente naquelas que apresentam deterioração avançada associada a processos de carbonatação e perda de durabilidade, nas quais a incerteza quanto ao desempenho estrutural real é elevada.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a aptidão estrutural de uma edificação existente de concreto armado por meio de uma abordagem baseada na integração de inspeção visual, END e prova de carga, com o propósito de subsidiar a tomada de decisões técnicas quanto ao seu possível uso, intervenção ou reabilitação. O enfoque é desenvolvido por meio de um estudo de caso de uma edificação com deterioração avançada, no qual os resultados obtidos pelas diferentes técnicas são analisados de forma integrada, permitindo estabelecer um diagnóstico estrutural mais representativo do estado real da edificação. A principal contribuição do estudo reside em demonstrar que a integração dos resultados provenientes dos END e da prova de carga permite identificar os alcances e limitações de cada técnica, fortalecendo o processo de avaliação estrutural e a tomada de decisões em contextos de informação limitada.

## 2. METODOLOGIA

O presente trabalho corresponde a um estudo de caso de caráter metodológico aplicado, cujo objetivo é avaliar a aptidão estrutural de uma edificação existente por meio da integração de diferentes técnicas de avaliação. O estudo apresenta caráter diagnóstico, ao analisar o estado estrutural de uma edificação específica, e, simultaneamente, caráter demonstrativo, ao evidenciar a aplicabilidade da metodologia proposta em condições reais de campo.

### 2.1 Abordagem metodológica proposta

A metodologia adotada baseia-se na aplicação complementar de END e prova de carga estática, constituindo uma proposta para a avaliação estrutural de uma edificação existente por meio de um estudo de caso. A Figura 1 apresenta o detalhamento do procedimento adotado no presente estudo.

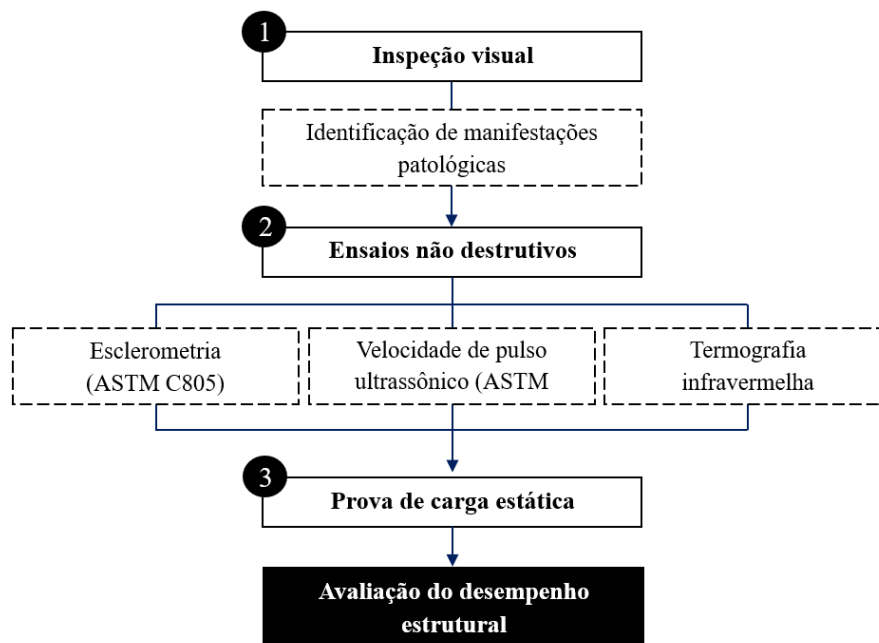


Figura 1. Procedimento proposto.

Foi estabelecido um marco de decisão com base na interpretação integrada dos resultados obtidos por meio de inspeção visual, END e prova de carga. Foram definidos três cenários possíveis, com base na literatura (Harris, 2001; Watt, 2025): (1) apta para uso, quando os elementos estruturais atendem aos critérios de serviço e não apresentam deterioração significativa; (2) apta com restrições, quando são identificadas deficiências parciais, mas a estrutura mantém comportamento estável sob carregamento; e (3) não apta, quando são evidenciados deterioração avançada, baixa

qualidade do material ou não atendimento aos critérios de referência na prova de carga. A avaliação considerou: (a) a severidade da deterioração identificada por meio da inspeção visual; (b) a qualidade do material estimada a partir dos END; e (c) o atendimento aos critérios de referência da prova de carga conforme a ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025).

A abordagem complementar adotada não implica a aplicação de todas as técnicas nos mesmos elementos estruturais, mas sim a integração de resultados obtidos em diferentes componentes do sistema, considerando as limitações práticas de cada método. Nesse sentido, os END foram aplicados em vigas e pilares, enquanto a prova de carga foi realizada em lajes, permitindo avaliar a resposta estrutural sob condições de serviço. A interpretação integrada dos resultados possibilita estabelecer um diagnóstico estrutural em nível de sistema. Assim, a complementaridade da abordagem fundamenta-se na avaliação de diferentes níveis do sistema estrutural — material, elemento e comportamento global — e não em uma correlação direta ponto a ponto entre técnicas aplicadas em um mesmo elemento.

## 2.2 Descrição da edificação avaliada

Foi avaliada uma edificação de concreto armado de dois pavimentos, com idade aproximada de 20 anos, a qual não dispõe de projetos estruturais nem de memória de cálculo. A estrutura é composta por um sistema de lajes nervuradas apoiadas sobre vigas e pilares de concreto armado. A edificação encontra-se em estado de obra bruta, sem cobertura, permanecendo exposta ao ambiente sem medidas de proteção. Em decorrência da exposição prolongada a condições ambientais adversas, a edificação apresenta um estado de conservação desfavorável, evidenciado por diversas manifestações patológicas, descritas na Seção 3.1.

Na Figura 2 são apresentados os projetos arquitetônicos do pavimento térreo e do pavimento superior da edificação, nos quais se identificam os elementos estruturais avaliados. Os códigos utilizados indicam o tipo de elemento — pilar (P) ou viga (V) — e o nível correspondente — pavimento térreo (T) ou pavimento superior (S); por exemplo, o código PT-1 corresponde ao primeiro pilar identificado no pavimento térreo.

## 2.3 Programa experimental

### 2.3.1 Inspeção visual

A inspeção visual consistiu na observação direta e no registro fotográfico do estado superficial da edificação. Essa etapa permitiu identificar elementos estruturais com manifestações patológicas e zonas com deterioração avançada, bem como elaborar um mapa de danos que possibilitou localizar e classificar as principais patologias presentes na estrutura. A inspeção visual foi concebida como uma etapa de diagnóstico preliminar qualitativo, voltada à identificação de manifestações patológicas relevantes, zonas críticas e elementos estruturais potencialmente comprometidos. Essas informações permitiram definir os pontos de aplicação dos END e a seleção das lajes a serem avaliadas por meio de prova de carga, priorizando aqueles elementos com maior evidência de deterioração.

### 2.3.2 END

Para o ensaio de esclerometria, foi utilizado um esclerômetro digital Controls, modelo 58-C0181/DGT, seguindo as diretrizes da ASTM C805 (*ASTM International*, 2018). Devido a limitações geométricas, de acessibilidade e ao reduzido tamanho de algumas regiões avaliadas, o procedimento foi adaptado por meio da aplicação de uma malha regular de  $3 \times 3$  impactos por ponto de avaliação. Os valores atípicos foram descartados conforme os critérios estabelecidos na norma. Embora essa adaptação possa influenciar a representatividade estatística dos resultados, priorizou-se a obtenção de medições consistentes em múltiplos pontos do elemento. Nesse sentido, os resultados devem ser interpretados como estimativas indicativas da qualidade superficial do concreto, e não como valores absolutos de resistência. Os resultados obtidos correspondem ao

número de rebote (NR) e a uma estimativa indicativa da resistência à compressão (RC) superficial fornecida pelo equipamento. A interpretação considerou a influência da carbonatação do concreto, evidenciada pela presença de corrosão das armaduras e pelas condições de exposição ambiental. Nesse contexto, adotou-se uma redução estimativa na faixa de 30–40 %, conforme valores reportados na literatura (Malhotra & Carino, 2003; Breyse, 2012; Kumavat *et al.*, 2021), utilizada como um critério conservador para aproximar a resistência mecânica efetiva do material. Esse ajuste não representa uma medição direta, mas sim uma estimativa orientativa para a interpretação dos resultados.

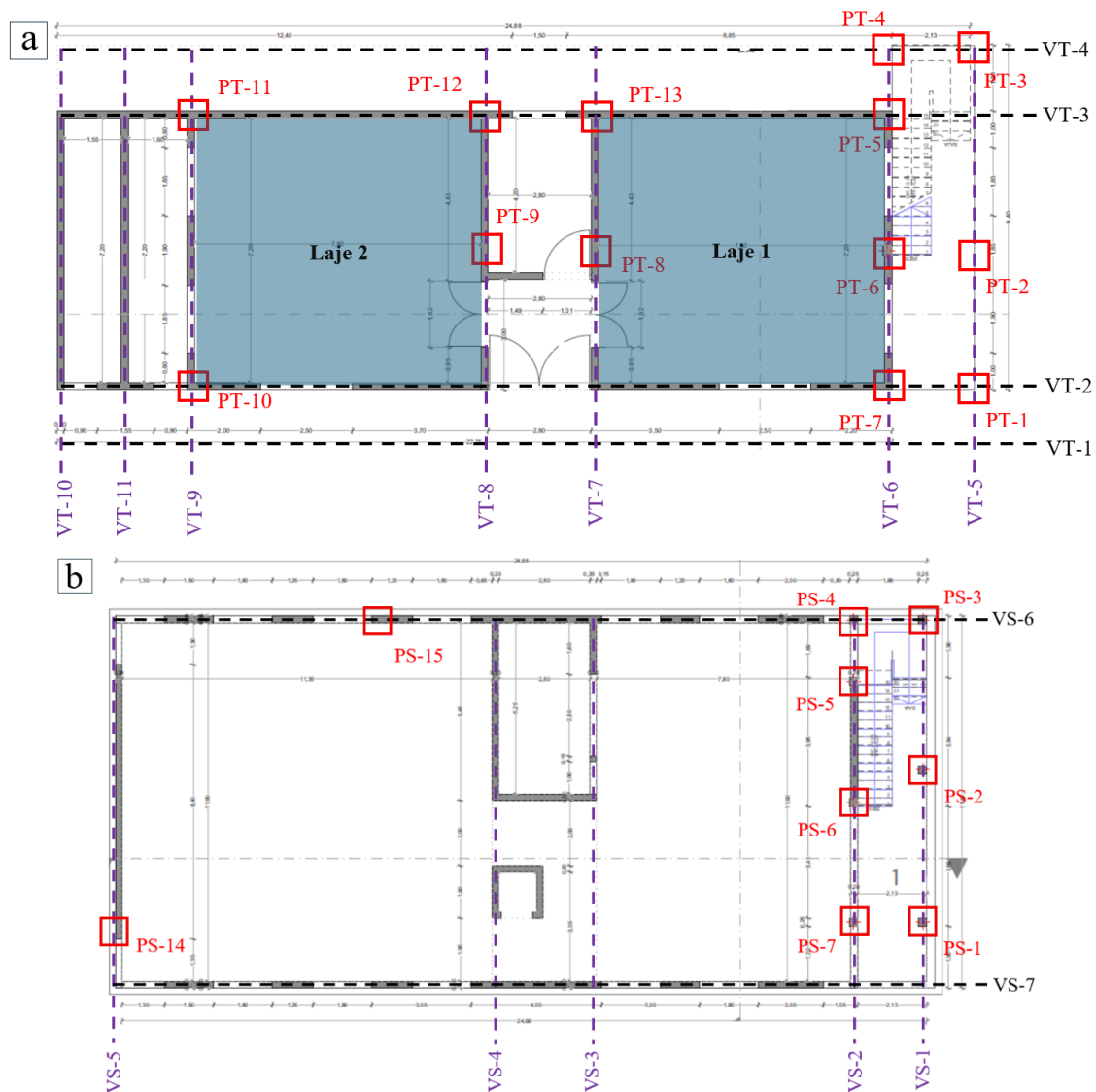


Figura 2. Planos da edificação: (a) pavimento térreo e (b) pavimento superior.

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi realizado utilizando um equipamento Controls, modelo 58-E4900, de acordo com as recomendações da ASTM C597 (ASTM *International*, 2016). As medições foram realizadas em múltiplos pontos dos elementos avaliados, coincidindo com aqueles onde foi aplicado o ensaio de esclerometria, a fim de permitir uma comparação direta entre ambos os métodos. Em cada ponto, registrou-se o tempo de propagação da onda ultrassônica, o qual foi convertido em velocidade por meio da Equação (1). Os valores de VPU foram utilizados como indicadores da qualidade interna do concreto e da possível presença de heterogeneidades, vazios ou descontinuidades internas (Aquino Rocha *et al.*, 2025).

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.

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

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

Onde  $d$  é a distância entre os transdutores (em m) e  $t$  é o tempo de propagação da onda ultrassônica (em s).

Como complemento aos END previamente descritos, foi aplicado o ensaio de termografia infravermelha utilizando uma câmera termográfica FLIR, modelo C2, com o objetivo de identificar anomalias térmicas associadas à deterioração interna do concreto, principalmente possíveis delaminações do cobrimento (Ichi & Dorafshan, 2022; Ibrahim *et al.*, 2026). A termografia infravermelha foi realizada sob condições ambientais não controladas, em uma estrutura existente exposta ao ambiente em Cochabamba, Bolívia. As medições foram realizadas no período diurno, a uma temperatura ambiente de aproximadamente 22 °C e umidade relativa de 75 %, com presença de radiação solar, o que possibilitou a geração de gradientes térmicos naturais na superfície dos elementos avaliados. Não foi aplicado um procedimento de excitação térmica artificial, de modo que a análise se baseia em termografia passiva (Rocha *et al.*, 2017).

### 2.3.3 Prova de carga estática

A prova de carga estática foi realizada em duas lajes da edificação (Laje 1 e Laje 2), identificadas na Figura 2. Embora as dimensões em planta das lajes sejam de aproximadamente 11,8 × 7,8 m, para fins do ensaio foram consideradas apenas as dimensões efetivamente apoiadas, correspondentes a um vão de 7,8 × 7,2 m, definido pelas condições reais de apoio do pavimento térreo. O ensaio foi desenvolvido com base nas diretrizes estabelecidas no Capítulo 27 da ACI 318 (American Concrete Institute, 2025), relativas à avaliação de estruturas existentes, por meio da aplicação gradual e controlada de uma carga equivalente à carga de serviço. Em condições ideais, a carga de ensaio deveria ser aplicada de forma uniformemente distribuída sobre toda a superfície da laje. No entanto, devido a limitações práticas e logísticas inerentes a estruturas existentes, bem como às características específicas da edificação avaliada, adotou-se um procedimento alternativo baseado no princípio de equivalência do momento fletor máximo, concentrando a carga em uma área central de 2,0 × 2,0 m, correspondente à região mais desfavorável do ponto de vista estrutural. Para a determinação da carga equivalente, foi realizada uma análise estrutural por meio do software SAP2000, considerando uma carga distribuída de 400 kg/m<sup>2</sup>, além da carga permanente da laje, correspondente à combinação de carga de serviço mais crítica conforme as diretrizes da ACI 318 (American Concrete Institute, 2025). Sob essa condição, obteve-se um momento fletor máximo de aproximadamente 141 kg·m (Figura 3a). Posteriormente, determinou-se a magnitude da carga concentrada na área de 2 × 2 m necessária para reproduzir o mesmo momento fletor, resultando em uma carga equivalente de 750 kg/m<sup>2</sup>, garantindo a equivalência em termos de solicitação por flexão (Figura 3b).

A carga foi aplicada de forma progressiva em oito etapas, com incrementos de 100 kg/m<sup>2</sup> até atingir 700 kg/m<sup>2</sup>, seguida de uma etapa final de 50 kg/m<sup>2</sup> para completar a carga total de ensaio. Após atingir o nível máximo de carregamento, este foi mantido constante por um período de 24 horas, com o objetivo de avaliar o comportamento diferido da laje. Posteriormente, procedeu-se à descarga gradual do sistema, também em oito etapas. A Figura 4 ilustra o procedimento adotado durante a execução da prova de carga.

Durante o ensaio, foram registradas as deflexões máximas, a evolução do comportamento do elemento sob carregamento e a recuperação elástica após a descarga. Para isso, foi utilizado um sistema Datalog 8 Controls, modelo 58-C0239/A, equipado com quatro sensores de deflexão Gefran, identificados como S1, S2, S3 e S4. Esses sensores foram posicionados estrategicamente no centro e nos pontos médios das bordas da área de 2 × 2 m da laje.

Os resultados foram avaliados considerando critérios de referência baseados na ACI 318 (American Concrete Institute, 2025), incluindo: (a) uma deflexão máxima absoluta de 0,05 in (1,27 mm); (b)

a deflexão máxima admissível em função do vão principal da laje ( $L/2000 = 7800/2000 = 3,90$  mm); e (c) uma recuperação elástica mínima de 75 % após a descarga.

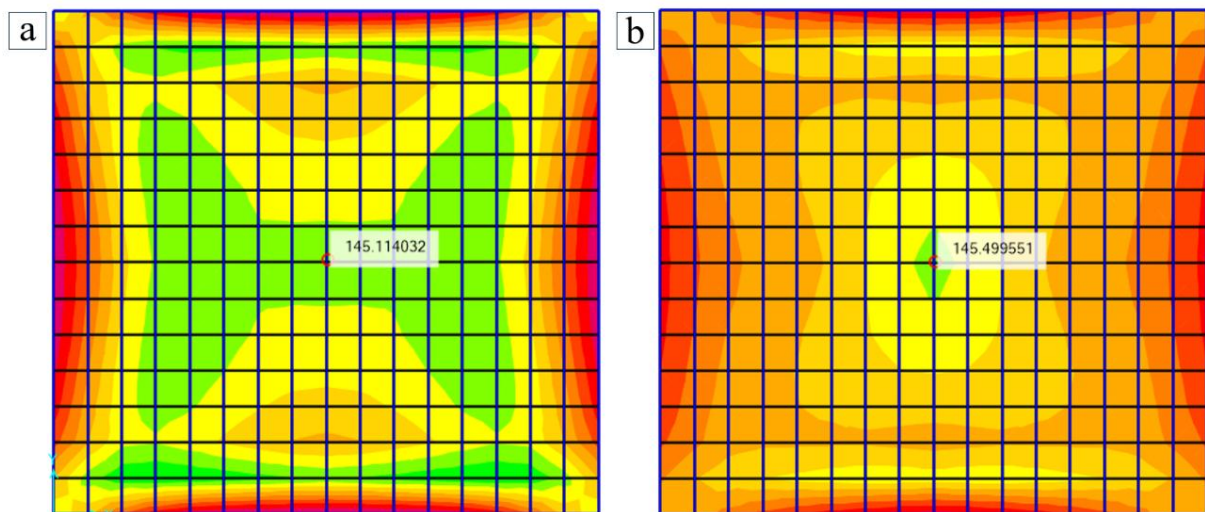


Figura 3. Momento fletor máximo: (a) com carga total e (b) com carga equivalente de  $750 \text{ kg/m}^2$  na região central de  $2 \times 2 \text{ m}$ .

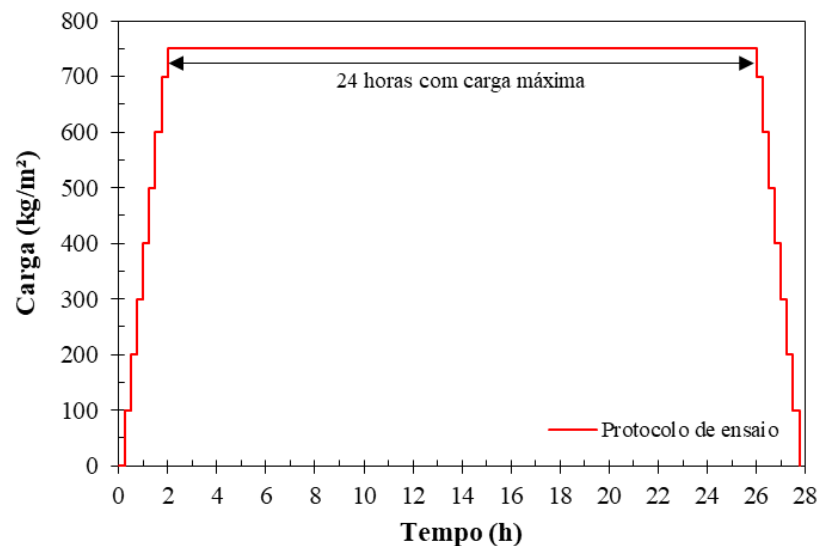


Figura 4. Protocolo de ensaio de carga e descarga.

Embora a configuração estrutural das lajes possa ser aproximada a um comportamento predominantemente unidirecional, a avaliação foi realizada utilizando critérios gerais de serviço como referência para a interpretação do comportamento estrutural, adotando-se um enfoque conservador. Para a interpretação dos resultados, foi estabelecida uma hierarquia de critérios, na qual o atendimento ao critério de recuperação elástica e ao limite de deflexão relativa ( $L/2000$ ) são considerados indicadores principais do comportamento estrutural em condições de serviço, enquanto a deflexão absoluta é utilizada como critério complementar. Nesse sentido, um elemento é considerado com comportamento estrutural aceitável quando atende aos critérios principais, ainda que possa apresentar desvios no critério de deflexão absoluta.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Inspeção visual

A Figura 5a apresenta uma vista geral da estrutura, evidenciando a exposição direta ao ambiente. De forma geral, observa-se uma degradação avançada do concreto, caracterizada pela presença de manchas escuras associadas à umidade e depósitos esbranquiçados superficiais, indicando processos de lixiviação e eflorescências (Smith & West, 2021; Nogueira Diniz *et al.*, 2023). Adicionalmente, são observados indícios de carbonatação do concreto associados a processos avançados de corrosão das armaduras. A Figura 5b apresenta a laje do pavimento superior, na qual se observa a ausência de revestimentos e de sistemas de proteção, bem como a superfície exposta diretamente ao ambiente. Identificam-se irregularidades superficiais, acúmulo de sujeira e desagregação do concreto, condições que justificaram a execução da prova de carga estática.



Figura 5. (a) Vista geral e (b) pavimento superior da edificação.

A superfície inferior das lajes apresenta deterioração generalizada (Figura 6), caracterizada pela presença de manchas escuras, lixiviação e eflorescências. Adicionalmente, foram identificadas zonas com irregularidades superficiais e descontinuidades locais, particularmente em regiões próximas aos apoios e aos nós viga-pilar, onde a deterioração é mais pronunciada. Essas manifestações patológicas indicam uma exposição prolongada ao ambiente, principalmente à umidade, bem como o desprendimento do cobrimento, fatores que influenciam diretamente a qualidade do material e a resposta mecânica dos elementos estruturais (Krentowski, 2021; Richardson, 2023).



Figura 6. Superfície inferior de: (a) laje e (b) balanço.

A Figura 7a apresenta a deterioração nos nós viga–pilar, onde foram identificadas zonas com perda de cobrimento, fissuração e alteração da superfície do concreto. Esses setores correspondem a regiões críticas do sistema estrutural, indicando vulnerabilidade da edificação em termos de funcionalidade e segurança. Por outro lado, a Figura 7b mostra a degradação avançada dos elementos, com perda de cobrimento e exposição das armaduras, acompanhada pela presença de produtos de corrosão. Essas manifestações confirmam processos de carbonatação do concreto associados à exposição prolongada sem proteção superficial (Fuhaid & Niaz, 2022; Poursaei & Angst, 2023). Na Figura 7c, observam-se manchas associadas à umidade, depósitos superficiais e perda localizada de material, principalmente em regiões próximas aos apoios e aos encontros com pilares. De modo geral, essas observações evidenciam um estado de conservação desfavorável dos elementos estruturais, justificando a aplicação de END e a avaliação do desempenho estrutural por meio da prova de carga estática.



Figura 7. (a) Nó viga–pilar, (b) corrosão das armaduras e (c) deterioração do concreto.

Com o objetivo de sistematizar as informações obtidas durante a inspeção visual, foi elaborado um mapa de danos da edificação, no qual são identificadas e localizadas as principais manifestações patológicas observadas (Figura 8). Esse mapa permite representar espacialmente a distribuição de patologias, tais como umidade, eflorescências, corrosão das armaduras, fissuração e desagregação do concreto, facilitando a identificação de zonas críticas do sistema estrutural. Em particular, observa-se uma maior concentração de danos em elementos horizontais expostos e em regiões próximas aos apoios e aos nós viga–pilar, o que evidencia uma relação direta entre as condições de exposição ambiental e a deterioração do material. Além disso, o mapa permitiu orientar a seleção dos pontos de aplicação dos END e das lajes avaliadas por meio de prova de carga, priorizando aquelas regiões com maior nível de deterioração. A partir da inspeção visual, foram identificadas principalmente patologias associadas à perda de cobrimento, umidade, eflorescências, corrosão das armaduras e processos de lixiviação, as quais podem ser classificadas qualitativamente como de severidade moderada a alta, especialmente em regiões de nós viga–pilar e em elementos expostos ao ambiente. Essas zonas correspondem a regiões críticas do sistema estrutural, nas quais a deterioração pode comprometer a aderência aço–concreto, a transferência de cargas e a rigidez local dos elementos.



Figura 8. Mapa de danos da edificação avaliada.

### 3.2 Esclerometria e VPU

A seleção dos elementos estruturais avaliados foi realizada por meio de uma amostragem direcionada, baseada em critérios de acessibilidade e evidências de deterioração identificadas durante a inspeção visual (Seção 3.1). Em particular, foram priorizados os elementos que apresentavam manifestações patológicas relevantes, com o objetivo de avaliar condições críticas do sistema estrutural. O número de pontos de medição e de elementos avaliados foi definido considerando as condições reais da edificação e as limitações operacionais inerentes ao trabalho de campo, buscando um equilíbrio entre a cobertura do sistema estrutural e a viabilidade de execução. Nesse sentido, os resultados obtidos correspondem a uma avaliação representativa de zonas críticas, mais do que a uma amostragem estatística exaustiva de toda a estrutura.

Os resultados de esclerometria e VPU obtidos em pilares e vigas são apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente. Os valores de RC estimados a partir do NR são apresentados juntamente com reduções de 30 % (RC-30%) e 40 % (RC-40%), aplicadas com o objetivo de considerar o processo de carbonatação, descrito na Seção 2.3.2.

No caso dos pilares, tanto no pavimento térreo quanto no pavimento superior (Figura 9a e Figura 10a), observa-se que os valores de RC são superiores a 25 MPa e, em casos específicos, superam 35 MPa, o que corresponderia a concretos adequados para fins estruturais (*American Concrete Institute*, 2025). No entanto, a presença de processos de carbonatação e, conseqüentemente, de corrosão no concreto armado indica que esses valores não refletem necessariamente o estado real do material. A RC foi estimada a partir do ensaio esclerométrico, o qual é influenciado pela carbonatação do concreto (*ASTM International*, 2018). Esse fenômeno está associado à formação

de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) na superfície (Qian *et al.*, 2023), o que aumenta localmente a dureza superficial e pode conduzir a uma superestimação da RC superficial (Kumavat *et al.*, 2021). Adicionalmente, diversos estudos têm demonstrado que a carbonatação pode gerar aumentos aparentes ou temporários da RC em matrizes cimentícias, associados à densificação da microestrutura e ao preenchimento parcial de poros (Lin *et al.*, 2025; Rocha *et al.*, 2025).

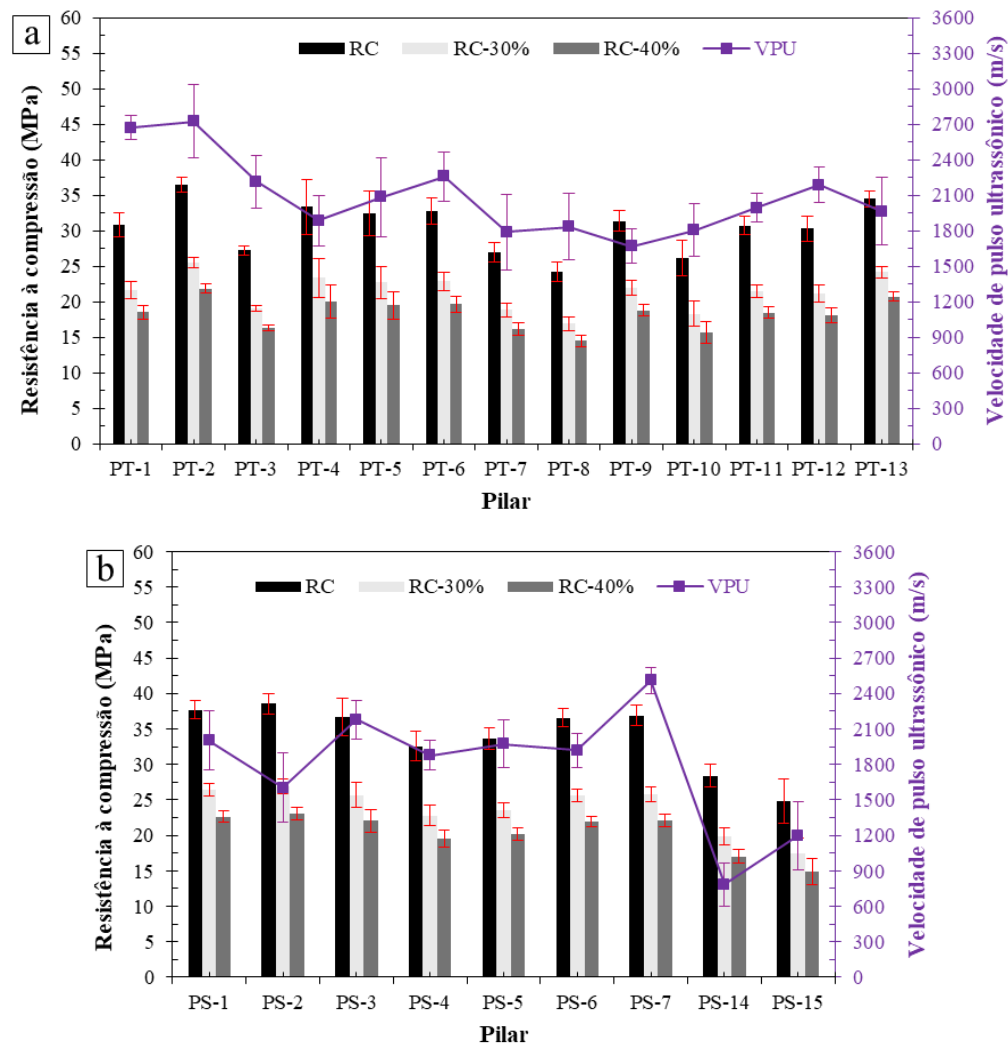


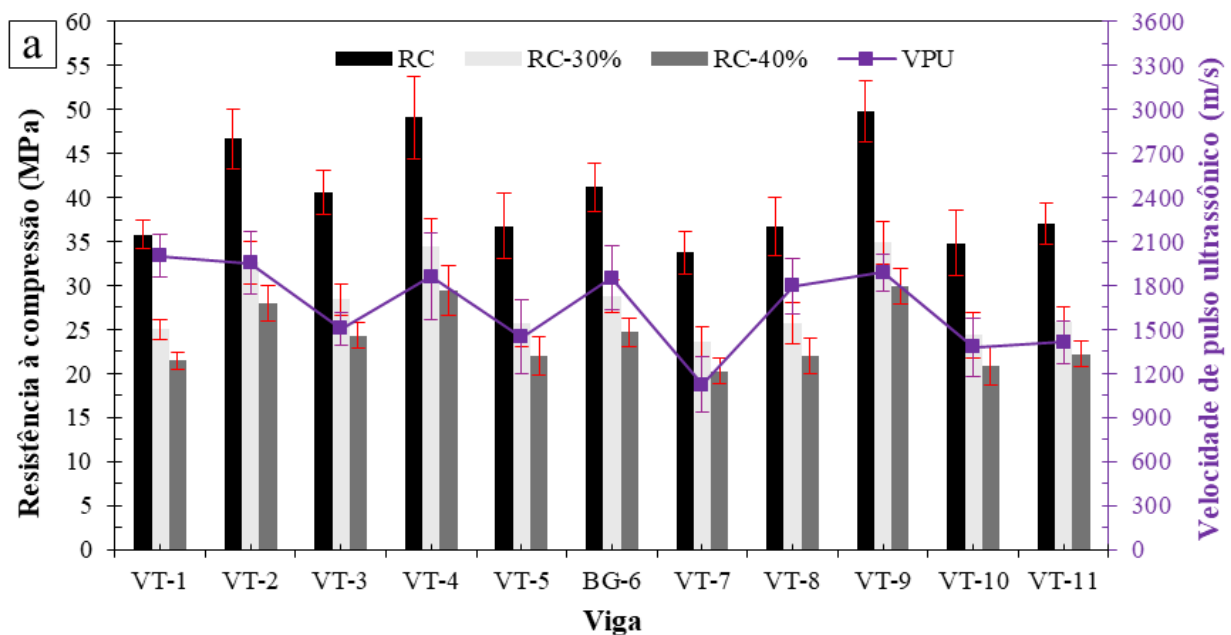
Figura 9. Resultados de esclerometria e VPU para pilares de: (a) pavimento térreo e (b) pavimento superior.

No caso das vigas (Figura 9b e Figura 10b), observa-se um comportamento semelhante ao verificado nos pilares, com a diferença de que os valores estimados de RC são mais elevados. Na maioria dos casos, registram-se valores superiores a 35 MPa, sendo inclusive identificados elementos que superam 45 e 50 MPa. Embora esses resultados possam sugerir uma elevada resistência à compressão, tanto as vigas quanto os pilares estiveram submetidos a processos de carbonatação decorrentes da exposição contínua ao ambiente por aproximadamente 20 anos, o que, juntamente com as evidências de corrosão observadas, limita a representatividade desses valores para a avaliação do desempenho estrutural real.

Nesse sentido, os valores de RC estimados para pilares e vigas foram ajustados por meio de uma redução da ordem de 30–40 %, conforme recomendações reportadas na literatura (Malhotra & Carino, 2003; Breysse, 2012; Kumavat *et al.*, 2021), com o objetivo de aproximar a resistência mecânica efetiva do concreto. Considerando essa redução, observa-se que os pilares atingem

valores máximos da ordem de 25 MPa, enquanto um número significativo apresenta resistências inferiores a 20 MPa, o que sugere que, nesses casos, o concreto não poderia ser considerado adequado para fins estruturais (*Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021; European Committee for Standardization, 2021; American Concrete Institute, 2025*). No caso das vigas, embora sejam identificados valores extremos que podem atingir aproximadamente 35 MPa, na maioria dos casos os valores ajustados situam-se na faixa de 20 a 25 MPa, indicando que esses elementos podem desempenhar função estrutural. No entanto, os elementos mais críticos do sistema correspondem aos pilares, por constituírem pontos-chave na transferência de cargas e no desempenho global da estrutura, o que pode comprometer a funcionalidade e a segurança da edificação (*Fédération internationale du béton, 2020; American Concrete Institute, 2025*).

No caso do ensaio de VPU aplicado aos pilares, observa-se uma relação proporcional com os valores estimados de RC, de modo que valores mais elevados de RC correspondem a maiores velocidades de pulso ultrassônico, evidenciando uma coerência geral entre ambos os métodos de avaliação. No entanto, os valores de VPU concentram-se, em média, na faixa de 1750 a 2700 m/s, sendo também registrados valores pontuais da ordem de 1200 e 900 m/s, os quais correspondem a categorias de concreto de qualidade deficiente a muito deficiente, segundo critérios reportados na literatura (Cánovas, 1988; Bungey & Grantham, 2006). Embora a carbonatação tenha influenciado os resultados do ensaio esclerométrico devido ao seu caráter superficial, o ensaio de VPU permitiu uma avaliação mais representativa da qualidade interna do concreto. Nesse sentido, os resultados evidenciam a presença de discontinuidades, vazios e possíveis defeitos internos, associados principalmente a processos de corrosão das armaduras e à deterioração da matriz cimentícia (Othman & Ayop, 2021; Aquino Rocha *et al.*, 2025).



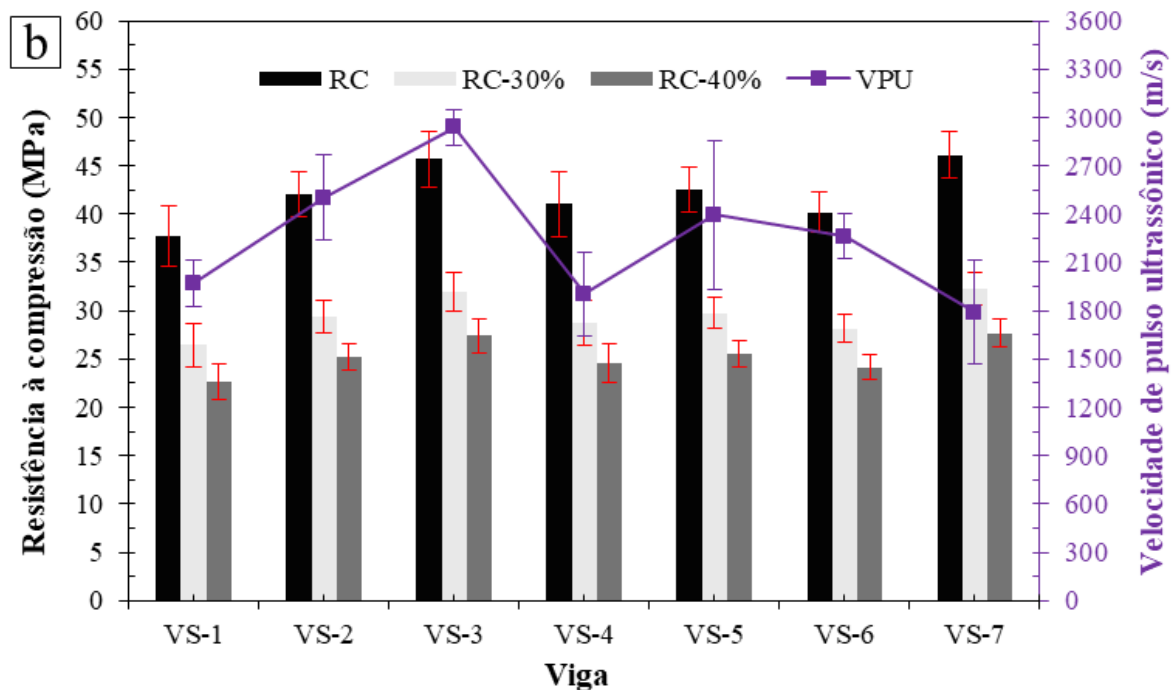


Figura 10. Resultados de esclerometria e VPU para vigas de: (a) pavimento térreo e (b) pavimento superior.

No caso das vigas, observa-se um comportamento semelhante ao dos pilares. No pavimento térreo, os valores de VPU são, em geral, mais baixos, situando-se em uma faixa aproximada entre 1000 e 2100 m/s, enquanto no pavimento superior registram-se valores mais elevados, entre 1800 e 3000 m/s. No entanto, a dispersão dos dados evidencia uma marcada heterogeneidade do material, indicando que o concreto não apresenta uma qualidade uniforme nem adequada. Embora alguns setores apresentem valores relativamente mais elevados de VPU, os intervalos obtidos correspondem, em sua maioria, a categorias de qualidade regular a muito deficiente (Cánovas, 1988; Bungey & Grantham, 2006). Em conjunto, os resultados de VPU e esclerometria sugerem que, embora a resistência superficial possa estar superestimada devido aos efeitos da carbonatação, a qualidade interna do concreto encontra-se comprometida, o que limita o desempenho estrutural real dos elementos avaliados. A coerência entre os resultados obtidos em diferentes pontos, bem como sua concordância com a inspeção visual, reforça a validade da interpretação adotada, apesar da redução na densidade de medição.

### 3.3 Termografia infravermelha

De forma complementar aos ensaios de esclerometria e VPU, foi aplicada a termografia infravermelha em diferentes elementos da edificação, com o objetivo de identificar possíveis defeitos e anomalias internas. A Figura 11a apresenta a imagem digital de um nó viga-pilar, correspondente ao elemento apresentado na Figura 7b, no qual se evidencia visualmente a corrosão das armaduras e a degradação do material. No termograma (Figura 11b), identificam-se anomalias térmicas localizadas, caracterizadas pela presença de diferentes gradientes térmicos. Essas variações não correspondem a um gradiente térmico uniforme, mas se concentram em regiões específicas do elemento, coincidentes com as zonas de deterioração observadas na imagem digital. Em particular, o setor identificado como SP3 apresenta temperaturas inferiores às do concreto circundante, o que sugere a possível presença de delaminação ou vazio interno, associado a um potencial de desprendimento do cobrimento (Aquino-Rocha *et al.*, 2024).

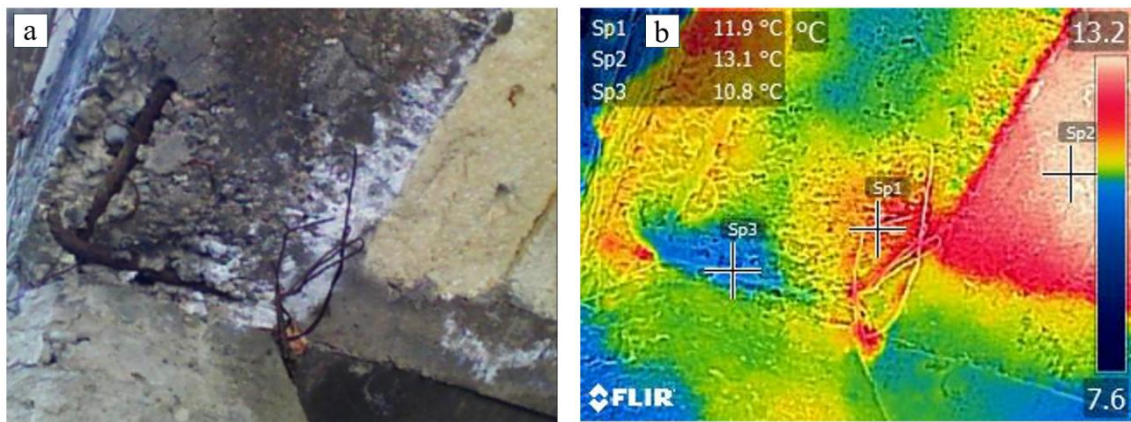


Figura 11. Nó viga-pilar: (a) imagem digital e (b) termograma.

No caso das vigotas da laje (Figura 12a), o termograma correspondente (Figura 12b) apresenta contrastes térmicos diferenciados dentro de um mesmo elemento (SP1 e SP2), com uma diferença de temperatura da ordem de 0,9 °C, o que permite a identificação de possíveis defeitos internos (Rocha *et al.*, 2018). Essas zonas coincidem com regiões onde foram observadas eflorescências, perda de cobrimento e sinais de lixiviação durante a inspeção visual, indicando que as variações térmicas estão associadas a processos de degradação interna do concreto, principalmente relacionados à presença de umidade e à perda de compacidade do material (Avdelidis & Moropoulou, 2004).

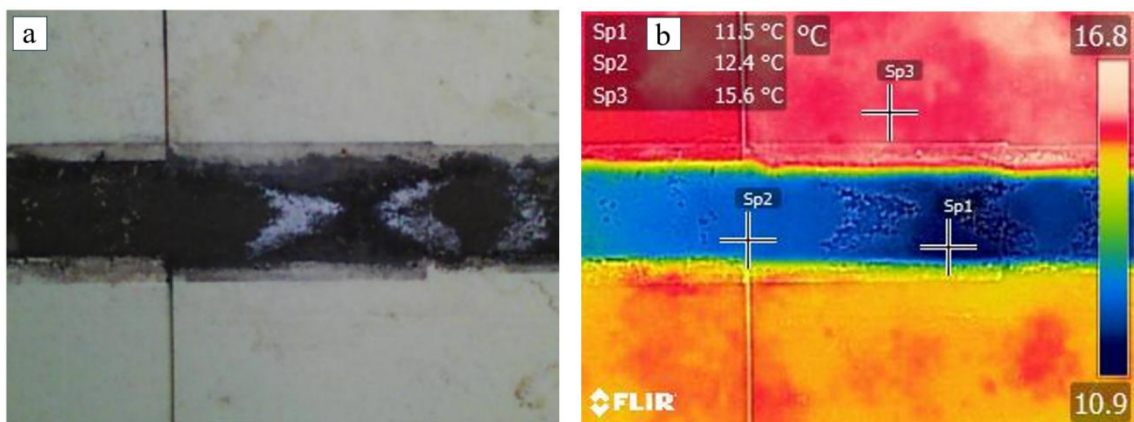


Figura 12. Vigota de laje: (a) imagem digital e (b) termograma.

A Figura 13a apresenta uma imagem digital da laje, cujo termograma (Figura 13b) evidencia regiões com temperaturas superficiais superiores em relação ao entorno e ausência de uniformidade térmica. Esse comportamento indica a presença de vazios e/ou delaminações, uma vez que essas zonas, por estarem diretamente expostas à radiação solar, tendem a aquecer mais rapidamente do que o material íntegro, devido à interrupção da transferência de calor, indicando um risco de desprendimento do cobrimento (Aquino-Rocha *et al.*, 2024; Ibrahim *et al.*, 2026). Um comportamento semelhante é observado na Figura 14a, referente a um elemento diretamente exposto à radiação solar. Nesse caso, o termograma (Figura 14b) apresenta regiões com temperaturas superiores às do entorno, indicando igualmente a presença de defeitos internos no elemento.

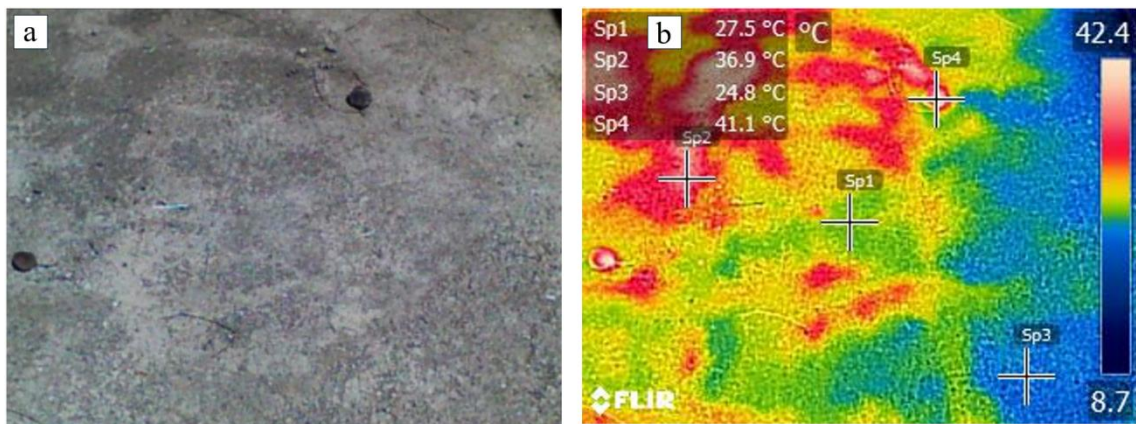


Figura 13. Vigota de laje: (a) imagem digital e (b) termograma.

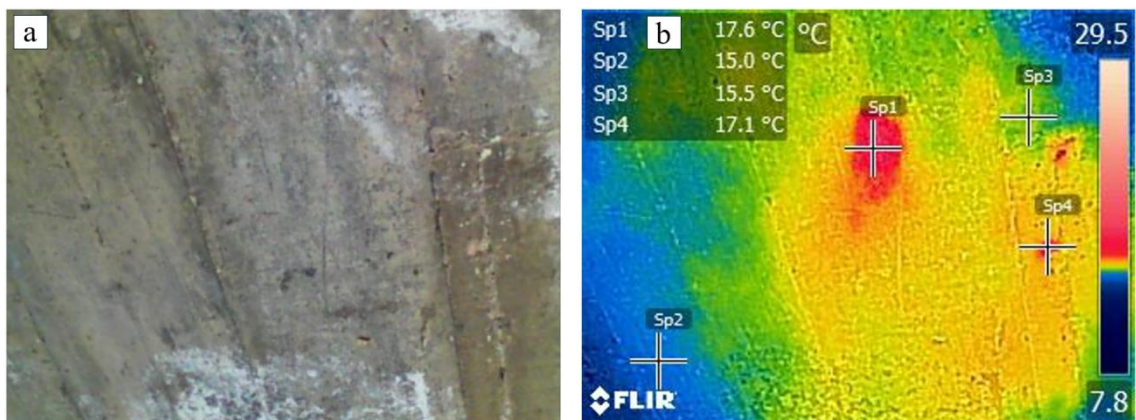


Figura 14. Elemento exposto: (a) imagem digital e (b) termograma.

Os resultados da termografia infravermelha devem ser interpretados de forma qualitativa, como indicadores de possíveis anomalias térmicas associadas a defeitos internos, e não como uma avaliação quantitativa do estado do material. Apesar da ausência de condições controladas, por se tratar de uma técnica passiva, as anomalias térmicas identificadas apresentam coerência com as zonas de deterioração observadas por meio da inspeção visual e com os resultados dos END, o que reforça a validade da interpretação adotada. Em conjunto, os resultados da termografia infravermelha, inspeção visual, esclerometria e VPU indicam que a deterioração identificada não se limita à superfície do concreto, mas está associado a um processo de degradação interna, evidenciando uma heterogeneidade significativa e comprometimento da integridade do material.

### 3.4 Prova de carga

As deflexões obtidas durante a prova de carga estática são apresentadas na Tabela 1 para a Laje 1 e a Laje 2, na qual a cor vermelha indica o não atendimento ao limite de deflexão máxima admissível, de acordo com os critérios baseados na ACI 318 (*American Concrete Institute, 2025*), conforme detalhado na Seção 2.3.3. As deflexões foram registradas em cada etapa de carregamento incremental, durante o período de carga sustentada de 24 h, bem como durante o processo de descarga gradual e a recuperação elástica imediata do sistema. Em ambas as lajes, as deflexões aumentaram de forma contínua e progressiva à medida que a carga foi incrementada até atingir a carga total de ensaio de 750 kg/m<sup>2</sup> (100 %). As Figuras 15 e 16 apresentam a evolução temporal completa das deflexões medidas para a Laje 1 e a Laje 2, respectivamente, incluindo as fases de carregamento, carga sustentada e descarga.

Durante o período de carga sustentada de 24 h, foi registrado um aumento adicional das deflexões, atribuído ao comportamento diferido do sistema. Esse efeito foi mais pronunciado na Laje 2,

evidenciando maior sensibilidade ao carregamento e menor rigidez global do elemento. Após a descarga gradual, observou-se uma recuperação parcial das deflexões, o que permitiu quantificar a deflexão residual instantânea e o grau de comportamento elástico de cada laje. Os percentuais de recuperação e o atendimento aos critérios baseados na ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025) são apresentados na Tabela 2, na qual a cor verde indica atendimento e a cor vermelha indica não atendimento.

Na Laje 1, as deflexões máximas registradas situaram-se entre 2,016 mm e 2,381 mm. Embora esses valores superem o critério absoluto de deflexão de 0,05 in ( $\leq 1,27$  mm), atendem ao critério de deflexão máxima em função do vão efetivo da laje ( $\leq 3,90$  mm). Da mesma forma, a recuperação elástica foi superior a 75 % em todos os sensores, indicando um comportamento predominantemente elástico, com deformações residuais reduzidas e uma resposta estrutural estável sob a carga de ensaio. Em contrapartida, a Laje 2 apresentou um comportamento desfavorável. As deflexões máximas atingiram valores entre 3,828 mm e 4,983 mm, superando tanto o limite absoluto de deflexão ( $\leq 1,27$  mm) quanto o critério associado ao vão efetivo da laje ( $\leq 3,90$  mm) em todos os sensores. Quanto à recuperação elástica, apenas os sensores S1 e S2 atenderam ao critério de 75 %, enquanto os sensores S3 e S4 apresentaram valores inferiores, evidenciando deformações residuais mais significativas e um comportamento parcialmente inelástico. Com base nesses critérios, a Laje 1 apresenta comportamento estrutural aceitável em condições de serviço, enquanto a Laje 2 não atende aos critérios principais, evidenciando desempenho estrutural desfavorável.

Tabela 1. Deflexões registradas durante a prova de carga estática.

Etapa de carregamento	Carga aplicada acumulada (kg/m <sup>2</sup> )	Laje 1 – Deflexão (mm)				Laje 2 – Deflexão (mm)			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carregamento 1 (13,33%)	100	0,131	0,238	0,180	0,230	0,369	0,274	0,430	0,420
Carregamento 2 (26,67%)	200	0,336	0,516	0,380	0,510	0,559	0,747	0,830	0,810
Carregamento 3 (40,00%)	300	0,559	0,725	0,580	0,730	0,929	1,147	1,290	1,260
Carregamento 4 (53,33%)	400	0,680	0,874	0,700	0,900	1,314	1,574	1,820	1,780
Carregamento 5 (66,67%)	500	0,880	1,129	0,910	1,170	1,667	2,037	2,330	2,300
Carregamento 6 (80,00%)	600	1,104	1,375	1,080	1,430	2,031	2,531	2,870	2,850
Carregamento 7 (93,33%)	700	1,313	1,633	1,300	1,700	2,395	3,012	3,400	3,390
Carregamento 8 (100,00%)	750	1,378	1,174	1,410	1,820	2,631	3,325	3,750	3,740
Em 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 o ensaio		2,077	2,357	2,016	2,381	3,828	4,565	4,983	4,907

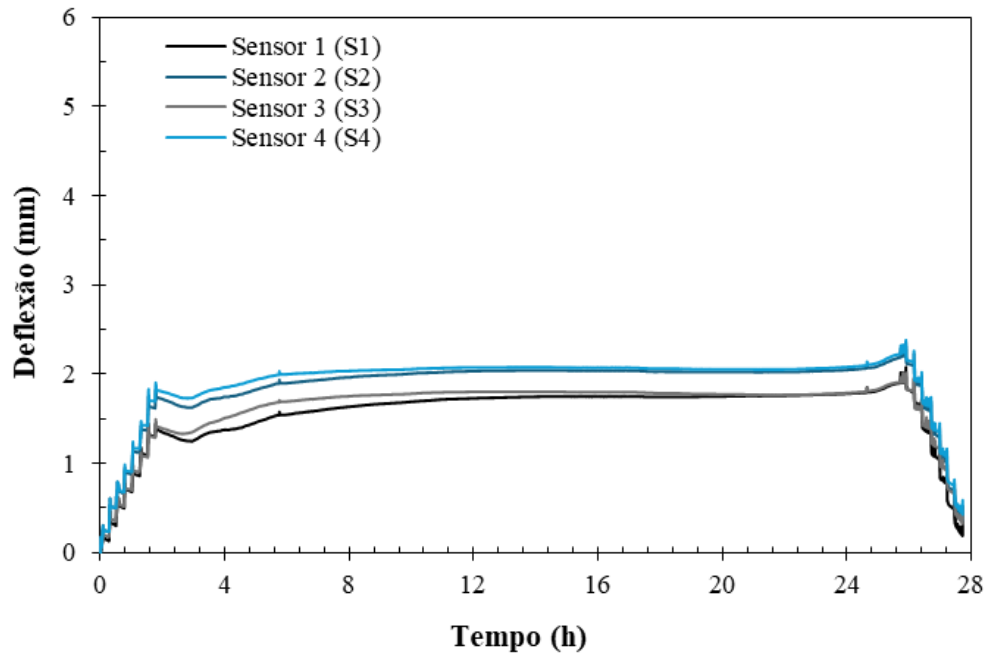


Figura 15. Evolução temporal da deflexão para a Laje 1.

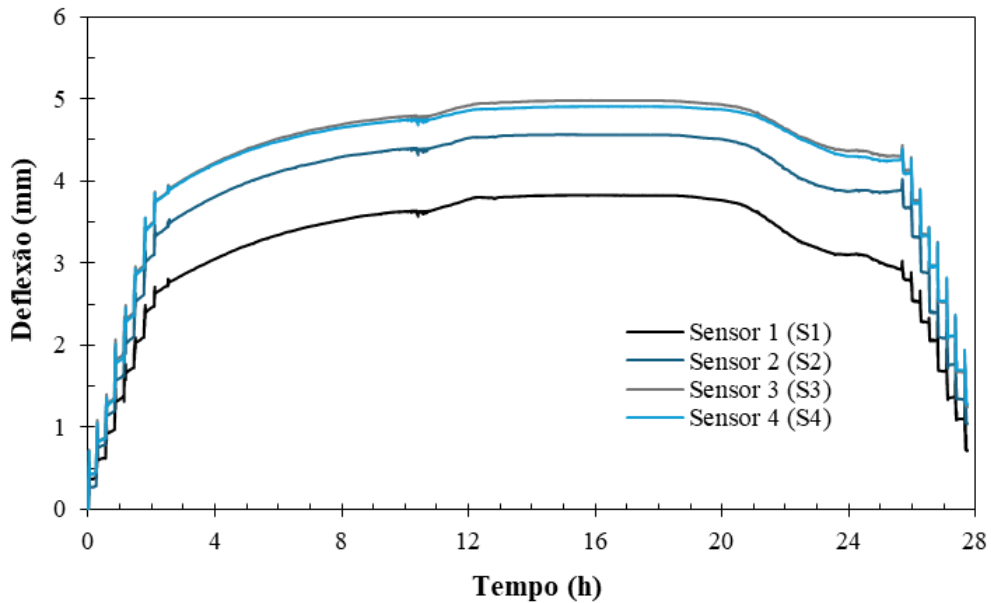


Figura 16. Evolução temporal da deflexão para a Laje 2.

Tabela 2. Critérios de aceitação

Sensor	Laje 1			Laje 2		
	Recuperação (%)	Deflexão máxima		Recuperação (%)	Deflexão máxima	
		≤ 1,27 mm	≤ 3,90 mm		≤ 1,27 mm	≤ 3,90 mm
S1	90,76	Não atende	Atende	81,27	Não atende	Não atende
S2	84,90	Não atende	Atende	77,53	Não atende	Não atende
S3	83,13	Não atende	Atende	74,91	Não atende	Não atende
S4	81,52	Não atende	Atende	73,91	Não atende	Não atende

Durante a execução do ensaio, não foi detectada fissuração visível adicional em nenhuma das lajes, nem durante as etapas de carregamento incremental, nem durante o período de carga sustentada, nem durante a descarga. No entanto, a presença de processos prévios de fissuração e lixiviação limitou a identificação visual de fissuras induzidas exclusivamente pela prova, sem descartar a possível existência de microfissuração ou danos internos não observáveis superficialmente. De modo geral, a Laje 1 apresentou um comportamento estável e controlado, com resposta progressiva aos incrementos de carga e adequada recuperação elástica, embora não atenda ao critério de deflexão máxima absoluta. Em contraste, a Laje 2 apresentou deflexões excessivas, recuperação elástica insuficiente em parte da área avaliada e maior sensibilidade ao efeito da carga sustentada, não atendendo, portanto, aos critérios de aceitação em estado de serviço, com base na ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025).

A complementaridade dos resultados obtidos por meio da inspeção visual, esclerometria, VPU, termografia infravermelha e prova de carga estática permitiu estabelecer uma avaliação global do estado estrutural da edificação. A inspeção visual e a termografia infravermelha evidenciaram zonas com deterioração superficial, anomalias térmicas e defeitos internos associados à umidade, lixiviação e corrosão, em concordância com os baixos valores de VPU registrados, que indicam perda de qualidade e de homogeneidade interna do concreto. Da mesma forma, a prova de carga demonstrou que, embora alguns elementos apresentem comportamento estável sob solicitações controladas, outros exibem deflexões excessivas e recuperação elástica insuficiente, refletindo uma redução do desempenho em condições de serviço.

#### 4. DISCUSSÃO

As observações realizadas por meio da inspeção visual e do mapa de danos foram consistentes com os resultados obtidos pelos END e pela prova de carga, evidenciando que a deterioração identificada não se limita à superfície, mas afeta o comportamento estrutural da edificação. De forma geral, os resultados de esclerometria e VPU indicam uma variabilidade significativa na qualidade do material, bem como valores indicativos de resistência reduzida em diversas zonas avaliadas, o que é coerente com as manifestações de deterioração observadas durante a inspeção visual. Os valores de VPU sugerem a presença de heterogeneidade interna e possíveis defeitos no concreto, o que pode influenciar o comportamento mecânico dos elementos estruturais. Assim, a coerência entre a distribuição espacial da deterioração, a baixa qualidade do material identificada por meio dos END e o comportamento estrutural observado na prova de carga permite estabelecer uma interpretação global do estado da estrutura.

Embora os END não permitam a obtenção direta de parâmetros estruturais, como a resistência efetiva de projeto ou o módulo de elasticidade, os resultados obtidos fornecem informações relevantes sobre a qualidade do material e seu estado de degradação. Nesse sentido, os valores reduzidos de VPU, a dispersão dos resultados e a possível superestimação da resistência superficial identificada por meio da esclerometria permitem inferir uma perda de homogeneidade e uma redução das propriedades mecânicas do concreto. Essas condições refletem-se no comportamento estrutural observado, particularmente na Laje 2, na qual são registradas deflexões excessivas e menor rigidez global, o que é consistente com um cenário de degradação mecânica do material. Dessa forma, os resultados dos END devem ser interpretados como indicadores qualitativos do estado estrutural do material, e não como parâmetros diretos de projeto.

A aplicação diferenciada dos END e da prova de carga responde às condições reais de avaliação de estruturas existentes. Os END foram aplicados em elementos primários do sistema resistente, como vigas e pilares, com o objetivo de caracterizar a qualidade do material e identificar possíveis defeitos internos, enquanto a prova de carga foi realizada em lajes, onde é tecnicamente viável avaliar a resposta estrutural direta sob condições de serviço. Nesse contexto, a prova de carga não tem como finalidade validar diretamente a capacidade resistente dos elementos avaliados por meio

dos END, mas sim fornecer informações sobre o comportamento estrutural global do sistema. Assim, o enfoque adotado baseia-se na complementaridade de escalas de avaliação (material–elemento–sistema), e não em uma validação direta entre técnicas aplicadas em um mesmo elemento estrutural.

Devido à ausência de informações estruturais detalhadas e à incerteza associada à configuração real do sistema resistente, os critérios normativos da ACI 318 (*American Concrete Institute*, 2025) foram utilizados como referência para a interpretação do comportamento observado, e não como uma verificação estrita de projeto. Dessa forma, os limites de deflexão e os critérios de serviço permitem identificar tendências de comportamento estrutural e possíveis deficiências em condições de serviço, adotando-se um enfoque conservador na avaliação. Reconhece-se como limitação a incerteza quanto ao modelo estrutural exato das lajes avaliadas, o que pode influenciar a interpretação precisa dos critérios normativos aplicados.

A elaboração de um modelo estrutural global não foi considerada no presente estudo devido ao elevado nível de incerteza associado à edificação avaliada, a qual não dispõe de projetos estruturais, memória de cálculo ou informações confiáveis sobre propriedades dos materiais e condições de fundação. Nesse contexto, a construção de um modelo numérico implicaria a adoção de múltiplos pressupostos, o que poderia resultar em uma representação pouco confiável do comportamento estrutural real. Por essa razão, o enfoque adotado prioriza a avaliação experimental *in situ*, por meio da integração de inspeção visual, END e prova de carga, permitindo a obtenção de informações diretas sobre o comportamento estrutural sob condições reais de serviço. Em estruturas existentes com informação incompleta, modelos numéricos podem introduzir mais incerteza do que confiabilidade quando não estão adequadamente calibrados.

A interpretação conjunta dos resultados permite estabelecer uma avaliação global do estado estrutural da edificação. Embora alguns elementos apresentem comportamento aceitável sob condições de carregamento controlado, a presença de deterioração avançada, heterogeneidade do material e o não atendimento aos critérios de serviço em determinados elementos evidenciam que a estrutura não apresenta um desempenho uniforme nem plenamente confiável. Em particular, enquanto a Laje 1 apresentou comportamento estrutural estável sob condições de serviço, a Laje 2 não atendeu aos critérios de aceitação estabelecidos, evidenciando deflexões excessivas e recuperação elástica insuficiente. Ainda que não exista correspondência espacial direta entre todas as técnicas aplicadas, a integração dos resultados é realizada em nível global do sistema estrutural, permitindo uma interpretação coerente do estado geral da estrutura.

Com base no marco de decisão proposto na metodologia, a avaliação estrutural permite classificar o comportamento da edificação em diferentes níveis de aptidão. Nesse sentido, a Laje 1 pode ser considerada apta com restrições, uma vez que apresenta comportamento estável sob condições de serviço, ainda que em um contexto de material heterogêneo e deterioração superficial. Por outro lado, a Laje 2 é classificada como não apta, devido ao não atendimento aos critérios de serviço, evidenciado por deflexões excessivas e recuperação elástica insuficiente. Em nível global, a edificação apresenta comportamento não uniforme e condição estrutural comprometida, associada à deterioração avançada, heterogeneidade do material e presença de defeitos internos identificados por meio dos END. Do ponto de vista da engenharia, são necessárias medidas de intervenção, tais como uma avaliação estrutural mais detalhada, reforço localizado ou reabilitação, antes de considerar a edificação apta para uso.

Por fim, o presente estudo apresenta limitações inerentes à avaliação de estruturas existentes com informação incompleta. Em primeiro lugar, não foram realizados ensaios destrutivos por meio da extração de testemunhos, o que limita a estimativa precisa da resistência real do concreto e a calibração dos resultados obtidos por meio dos END. Da mesma forma, a ausência de projetos estruturais e memória de cálculo introduz incertezas quanto à configuração do sistema resistente, às condições de apoio e aos caminhos reais de carregamento, restringindo a possibilidade de desenvolvimento de um modelo estrutural confiável. Além disso, os resultados obtidos por meio

dos END devem ser interpretados como estimativas indicativas da qualidade do material, estando sujeitos à influência de fatores como carbonatação, umidade e heterogeneidade do concreto. A seleção dos elementos avaliados baseou-se em critérios de acessibilidade e evidência de deterioração, de modo que a representatividade dos resultados pode não refletir integralmente o comportamento de toda a estrutura. No entanto, a integração dos resultados obtidos por meio de diferentes técnicas permite estabelecer uma avaliação coerente do estado estrutural global da edificação.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a aptidão estrutural de uma edificação existente de concreto armado por meio da aplicação complementar de inspeção visual, ensaios não destrutivos (esclerometria, velocidade de pulso ultrassônico e termografia infravermelha) e prova de carga estática. Com base nos resultados obtidos, estabelecem-se as seguintes conclusões:

- A inspeção visual evidenciou um estado de conservação desfavorável da estrutura, caracterizado por perda de cobrimento, presença de umidade, corrosão das armaduras, eflorescências e processos de lixiviação, permitindo a identificação de zonas críticas do sistema estrutural.
- Os resultados de esclerometria e VPU evidenciaram uma marcada heterogeneidade do material e valores indicativos de resistência reduzida. A esclerometria pode superestimar a resistência superficial devido aos efeitos da carbonatação, enquanto a VPU permitiu identificar possíveis defeitos internos, em concordância com as observações de campo.
- A termografia infravermelha possibilitou identificar anomalias térmicas associadas à umidade interna, vazios e possíveis delaminações, confirmando que a deterioração não se limita à superfície do concreto.
- A prova de carga estática evidenciou um comportamento estrutural diferenciado entre os elementos avaliados: a Laje 1 apresentou resposta estável sob condições de serviço, enquanto a Laje 2 não atendeu aos critérios de referência, apresentando deflexões excessivas e recuperação elástica insuficiente.
- A integração dos resultados obtidos por meio da inspeção visual, END e prova de carga permitiu estabelecer um diagnóstico estrutural global coerente, evidenciando que a deterioração identificada afeta tanto a qualidade do material quanto o desempenho estrutural da edificação.

Em termos do marco de decisão adotado, a estrutura avaliada apresenta comportamento não uniforme e condição estrutural desfavorável, caracterizada por deterioração avançada, heterogeneidade do material e deficiências no desempenho em serviço de determinados elementos. Nesse contexto, a edificação pode ser classificada globalmente entre apta com restrições e não apta, não podendo ser considerada plenamente adequada para uso em seu estado atual. Portanto, recomenda-se a realização de uma avaliação estrutural mais detalhada, bem como a implementação de medidas de intervenção, tais como reforço estrutural ou reabilitação dos elementos comprometidos, antes de sua entrada em serviço. Por fim, o enfoque metodológico adotado demonstra que a integração de técnicas de avaliação permite não apenas caracterizar o estado do material, mas também estabelecer critérios de decisão técnica em contextos de elevada incerteza, como no caso de edificações existentes sem informações de projeto.

## 6. REFERÊNCIAS

- 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*. 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., Abdelkhalek, 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.