

Avaliação não destrutiva das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração

A. Hernández Oroza^{1*} , E. Berreo Alayo¹, R. Expósito Mendez¹

* Autor de Contato: ahernandez@proyectos.ohc.cu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

Recepção: 01/02/2022 | Aceitação: 08/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar, por meio de classificação visual e ensaios não destrutivos, o estado de conservação de 32 vigas de madeira para reaproveitamento como projeto de restauração de um edifício histórico. Para isso, foram feitas medições do teor de umidade, penetrômetro, estimativa do módulo de elasticidade e tensão de ruptura por velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que 66% das vigas foram afetadas por apodrecimento, desfibramento e fissuração. Os ensaios realizados nas vigas deterioradas permitiram determinar que, para uma fiabilidade de 95%, das restantes 21 vigas foi possível reaproveitar 17 delas com densidade média de 0,4 g/cm³.

Palavras-chave: restauração; vigas de madeira; deterioração; penetrômetro; ultrassom.

Citar como: Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R. (2022), “Avaliação não destrutiva do estado de conservação das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 263 – 278, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

¹ Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

Contribuição de cada autor

Este trabalho do autor A. H. Oroza contribuiu com o projeto da investigação (100%), a redação do texto (60%), a discussão dos resultados (100%) e a revisão (100%). O autor E. Berreo Alayo contribuiu com a redação do texto (40%) e o processamento dos dados obtidos (100%). O autor R. Expósito Mendez contribuiu com a atividade de registro de las mediciones (100%). Todos os autores contribuem de forma equitativa na execução das medições e no desenvolvimento da investigação.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) 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 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

Non-destructive evaluation of the wooden beams of the Narciso López building in the Historic Center of Havana for reuse in its restoration

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate, through visual classification and non-destructive tests, the state of conservation of 32 wooden beams for reuse as a restoration project for a historic building. For this, measurements of the moisture content, penetrometer, estimation of the modulus of elasticity and breaking stress by ultrasonic pulse velocity were made. The results showed that 66% of the beams were affected by rot, defibration and cracking. The tests carried out on the deteriorated beams made it possible to determine that, for a reliability of 95%, of the remaining 21 beams it was possible to reuse 17 of them with an average density of 0.4 g/cm³.

Keywords: restoration; wooden beams; decay; penetrometer; ultrasound.

Evaluación no destructiva de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reuso en su restauración

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar, a través de clasificación visual y ensayos no destructivos, el estado de conservación de 32 vigas de madera para su reuso como proyecto de restauración de un edificio histórico. Para esto se realizaron mediciones del contenido de humedad, penetrómetro, estimación del módulo de elasticidad y tensión de rotura mediante velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados mostraron que el 66% de las vigas presentaban afectación por pudrición, desfibramiento y fisuración. Los ensayos realizados a las vigas deterioradas permitieron determinar que, para una confiabilidad del 95%, de las restantes 21 vigas era posible reutilizar 17 de ellas con una densidad promedio de 0.4 g/cm³.

Palabras clave: restauración; vigas de madera; deterioro; penetrómetro; ultrasonido.

Informações legais

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

Reserva de direitos 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 utilização da madeira como material de construção tem suas origens nos primeiros povoadamentos humanos, com a formação de cabanas primitivas. Os benefícios de suas propriedades em termos de manuseio, durabilidade, dureza, resistência e cor levaram ao seu uso ao longo da história da humanidade, tanto para a criação artística quanto construtiva. Em edificações onde a utilização deste material tem um desempenho estrutural, que influencia na segurança da obra e de seus operadores, é necessário realizar avaliações periódicas da integridade da madeira por meio de inspeções e testes (Szostak et al., 2020; Zielińska and Rucka, 2021). Fatores como a baixa disponibilidade global de madeira maciça, a diminuição do diâmetro dos troncos de espécies madeireiras que os tornam menos utilizáveis industrialmente, aliados à necessidade de preservar a memória histórica das edificações, levaram ao desenvolvimento de regulamentações, metodologias e técnicas de ensaio para avaliação da qualidade e estado de conservação deste material (Documento Básico SE-M, 2019; Manavella et al., 2019; Salazar et al., 2018; UNE 56544, 2011). Para tornar a intervenção em estruturas de madeira o menos invasiva possível, a aplicação de testes de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), resistografia, extração de parafuso ou penetrômetro permitem obter resultados confiáveis de medições in situ. para determinar o estado de conservação de elementos estruturais de madeira. Sua aplicação permite estimar parâmetros como densidade, tensão de ruptura e módulo de elasticidade para reutilização ou substituição de acordo com os requisitos do projeto. Embora o uso dessas técnicas ofereça vantagens em termos de segurança de classificação com base em seus resultados, a avaliação visual da madeira, como critério de aceitação, continua sendo atualmente o método mais utilizado, fundamentalmente devido ao seu baixo custo em relação ao uso de equipamentos, e a facilidade que a madeira oferece para mostrar suas características e lesões em sua superfície.

As edificações do Centro Histórico de Havana construídas antes do século XX têm em comum o uso da madeira como elemento estrutural de sustentação de mezaninos e lajes, onde se combinam sistemas de vigas e pranchas, com vigas e lajes por prancha. Essas madeiras, na época em que foram serradas para exploração como elemento estrutural, não foram classificadas por suas características devido à falta de regulamentação a esse respeito, por isso critérios como a largura dos anéis de crescimento, rachaduras, sacos de resina, gemas, deformações e alterações biológicas não foram consideradas de forma padronizada. Nesse sentido, a regulamentação em vigor (DIN EN 338:2016-07, 2016; ISO 9709:2018, 2018; UNE 56544, 2011), eles estabelecem critérios de rejeição que levariam à substituição total ou parcial de elementos de madeira que, após mais de um século de uso, demonstraram sua durabilidade e capacidade de carga, por serem projetados para madeira nova.

No entanto, quando se trata de reaproveitar elementos estruturais de madeira para reabilitação e conservação do patrimônio, é importante o uso combinado de critérios visuais e analíticos, pois estes últimos podem fornecer melhores critérios de sucesso em relação à classificação visual, como foi comprovado por (Rello et al., 2007) onde obtiveram que através do VPU é possível atingir até 72% em relação aos 53% de sucesso na qualidade da madeira. Ao longo dos anos de exploração, os materiais de construção sofrem diferentes formas de deterioração que, no caso da madeira, começam fundamentalmente pela presença de humidade devido ao facto de ser um material higroscópico e poroso. Nesse sentido, vários pesquisadores (Bratasz et al., 2010; Sotomayor Castellanos, 2015) mostraram a influência do teor de água na conservação da madeira e suas propriedades. De acordo com (Arriaga et al., 2006), o módulo de elasticidade pode variar em 2% para faixas de umidade entre 5% e 30%.

Com base nas considerações anteriores e na necessidade de avaliar o possível reaproveitamento de vigas de madeira em edifícios históricos, este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da avaliação do estado de conservação das vigas de madeira do primeiro nível de apoio entre os

eixos. 6:A-C do edifício Narciso López (Figuras 1 e 2), localizado no Centro Histórico de Havana. Foi construído em 1858 e tem 4 pisos, dos quais o rés-do-chão e a mezzanine são em paredes de pedra, enquanto os pisos superiores são em alvenaria. Os mezaninos são suportados por vigas de madeira de pinus (*pinus sp.*). Os processos de restauro iniciados em 2019 exigiram um diagnóstico patológico, pela primeira vez desde a construção do imóvel, para determinar a sua possível utilização e assim preservar, na medida do possível, os elementos originais do edifício.



Figura 1. Edifício Narciso López.
Fonte: Centro de Documentação
Arq. Fernando Salinas, Restaura,
OHCH

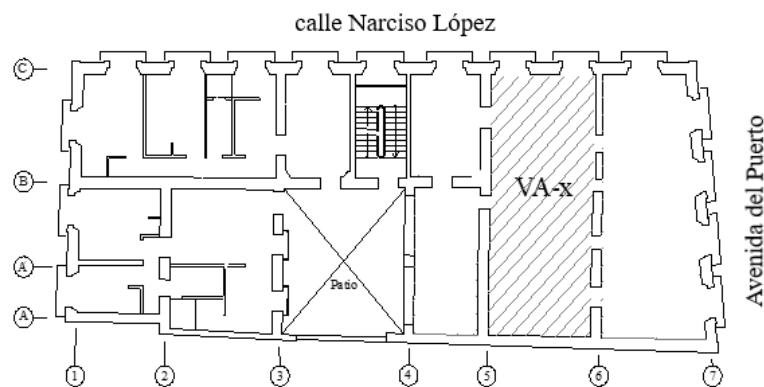


Figura 2. Vista em planta do primeiro nível do edifício.
Sinalização da área de estudo. Elaboração própria

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

O estudo começou com a remoção do piso e o desmantelamento de todas as vigas. Isso permite uma inspeção detalhada em todos os lados (Figuras 3 e 4), principalmente na área dos cabeçotes, que, por estarem embutidos nas paredes, apresentam maior deterioração por apodrecimento devido ao acúmulo de umidade no interior das juntas (Figuras 5 e 6). Essa primeira etapa permite registrar a posição, comprimento, direção e sentido de cada fissura, fissura, podridão e/ou desfibramento presente nas vigas, para as quais a distância da lesão em relação à cabeça foi tomada como referência (Figura 7). Adicionalmente, foram identificadas as áreas de teste que apresentam as condições ideais para a realização das medições. Em áreas onde há fissuras ou deterioração devido a diferentes formas de podridão (marrom, mole, etc.) não é possível realizar medições porque não se consegue uma correta transmissão ou confinamento do sinal, do emissor ao receptor ou os resultados obtidos são alterados pela presença de filmes microbianos que afetam a composição físico-química da madeira, degradando sua estrutura e densidade. Por outro lado, as técnicas de impacto ou penetração têm o inconveniente de não serem aplicadas em superfícies irregulares que influenciem o momento de impacto da broca, seja pela sua deformação, alteração no ângulo de entrada ou falta de madeira. oferecem um valor de densidade representativo das propriedades reais do elemento estrutural. Para a preparação das áreas de teste, foram selecionados dois cortes para cada feixe, livres de lesões superficiais.

Posteriormente, cada viga foi identificada utilizando o código local (VA-x), onde x representa um número consecutivo, a partir de 1. O local possui um total de 32 vigas de madeira, que se apoiam nos eixos 5-6. Para a determinação das dimensões, foi utilizada uma fita métrica e registradas as medidas de largura, profundidade e comprimento (Tabela 1). As cabeças das vigas foram identificadas com as letras A e B (Figura 8).



Figura 3. Etapa de inspeção detalhada em viga montada em burros de madeira



Figura 4. Inspeção e classificação visual de vigas desmontadas



Figura 5. Estado das cabeças do feixe

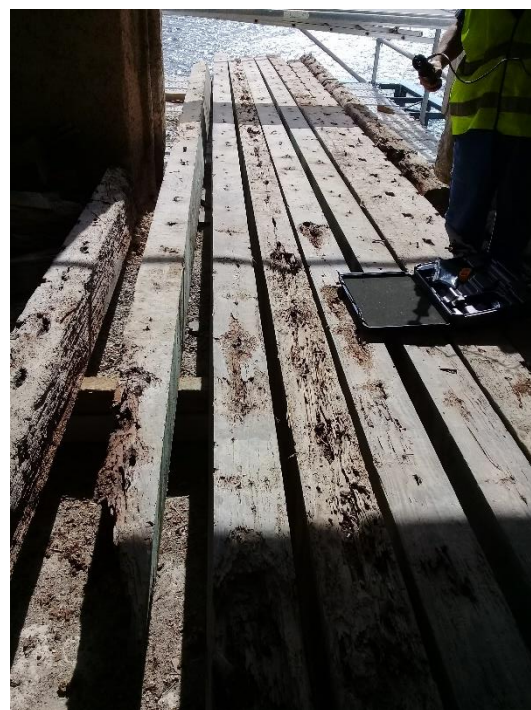


Figura 6. Vigas desmontadas com diferentes manifestações patológicas



Figura 7. Fita métrica da seção do feixe afetada



Figura 8. Identificação de vigas de madeira

2.1 Ensaios não destrutivos aplicados

Os testes aplicados consistiram em estimar a densidade (ρ), tensão de ruptura (f_k) e módulo de elasticidade dinâmico (MED), combinando as técnicas de penetrômetro e VPU. Para ambos é necessário fazer ajustes em relação ao teor de umidade, para o qual toma-se como referência o valor de 12%. No caso do penetrômetro, para determinar a densidade a 12% de umidade, a equação de ajuste utilizada foi (Kuklík, 2007):

$$\rho_{12} = -0.027102 * t_{p,12} + 0.727987 \quad (1)$$

$$t_{p,12} = t_p(1 - 0.007\Delta w) \quad (2)$$

$$\Delta w = w - 12 \quad (3)$$

Onde:

ρ_{12} = densidade da madeira a 12% de umidade; g/cm³

$t_{p,12}$ = profundidade de penetração na madeira com 12% de umidade; mm

t_p = profundidade de penetração na madeira testada; mm

w = umidade da madeira no momento da medição; %

Para a medida da VPU, o equipamento utilizado foi o Proceq Pundit Lab+, com transdutores cônicos de 54KHz (Figura 9). Elas foram colocadas perpendicularmente às fibras (Figura 10) e a distância entre elas foi programada no equipamento para cada viga. O ajuste foi feito a 12% de umidade usando a seguinte equação (Liñán et al., 2011):

$$VPU_{12} = 27.5(w - 12) + VPU \quad (4)$$

Onde:

VPU_{12} = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s

w = umidade da madeira no momento da medição; %

VPU = velocidade de pulso ultrassônica medida; m/s



Figura 9. Aplicação de testes VPU em vigas de madeira

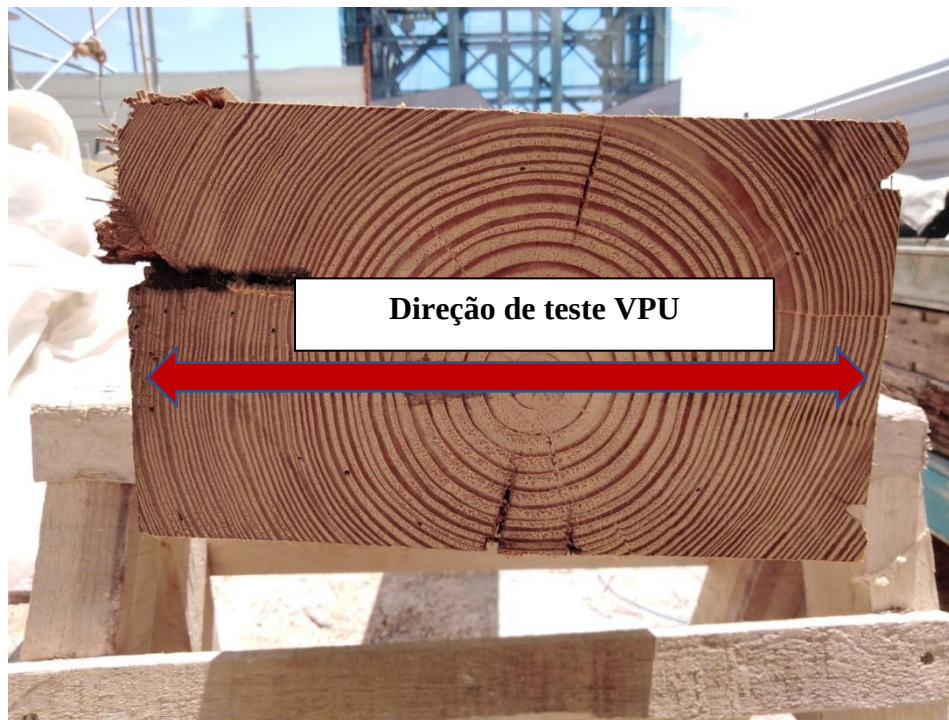


Figura 10. Esquema de aplicação VPU perpendicular à fibra

Com base nos mesmos critérios, foi calculada a tensão básica de ruptura (f_k) e o limite para determinação do estado de conservação das vigas de madeira:

$$f_k = (0.212VPU_{12} - 183.09) * 1/10 \quad (5)$$

Onde:

f_k = tensão de ruptura; MPa

VPU_{12} = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s

A partir das medições de VPU e dos valores de estimativa de densidade obtidos, os módulos dinâmicos foram calculados aplicando a equação utilizada por (Alquicira and Castellanos, 2021; Ettelaei et al., 2018):

$$MED = \rho * VPU_{12}^2 \quad (6)$$

Onde:

MED= módulo de elasticidade dinâmico; N/m²

ρ = densidade; Kg/m³

VPU_{12}^2 = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s

Para medir a umidade nas vigas de madeira foi utilizado o termo-higrômetro TotalCheck da Delmhorst (Figura 11).



Figura 11. Medição da umidade da superfície com o equipamento termo-higrômetro TotalCheck da Delmhorst

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação visual

Das 32 vigas inspecionadas, onze delas não apresentaram nenhum tipo de lesão (Tabela 1). De acordo com os requisitos de classificação visual da norma (UNE 56544, 2011), 4 feixes categorizados como ME-1 e 7 como ME-2 (Tabela 2). As demais vigas são classificadas como Rejeitadas considerando os danos recorrentes por trincas e fissuras longitudinais, apodrecimento e estilhaçamento, principalmente na área das cabeças até uma distância de aproximadamente 40 cm. No entanto, por se tratar de um projeto de reabilitação que pretende utilizar as vigas originais, com exceção da VA-18, todas elas precisam ser reavaliadas através dos ensaios propostos.

Tabela 1. Resultados da inspeção realizada nas vigas de madeira.

ID	Ampla (cm)	Camber (cm)	Comprimento (cm)	Lesões
VA-1	15	19.5	312	Lascado por PI a 70 cm da cabeça A.
VA-2	16	20	320	Fendas longitudinais descontínuas no meio da profundidade do FL, desde a cabeça B até um comprimento de 250 cm.
VA-3	18	20	309	Fendas descontínuas longitudinais no meio da profundidade.
VA-4	17.5	20	295	Desfiado em BS em todo o comprimento da viga.
VA-5	17.5	20	310	Fendas e fissuras longitudinais descontínuas por FL, no meio da profundidade. Desfiado por FS da cabeça B até um comprimento de 70 cm.
VA-6	14	20	304	Rachadura no FL, desde a cabeça B até um comprimento de 20 cm no meio da superelevação.
VA-7	12.5	20	304	Fenda longitudinal no meio da profundidade de ambas as faces laterais, desde a cabeça A até um comprimento de 90 cm.
VA-8	12.5	20	310	Fendas longitudinais da cabeça B até um comprimento de 60 cm na metade superior do FL. FL podridão da cabeça A, até um comprimento de 70 cm.
VA-9	14.5	20	309	Não foram observadas lesões.
VA-10	15.5	20	310	Fissura longitudinal na metade superior do FL, ao longo de todo o comprimento. Trituração superficial por FL, a 90 cm da cabeça B.
VA-11	17.5	21	310	Não foram observadas lesões.
VA-12	17	20	310	
VA-13	11.5	21.5	476	Triturado pelo FS afetando 5 cm da largura do FL e 2-3 cm da altura.
VA-14	11.5	21.5	475	Não foram observadas lesões.
VA-15	11.5	21.5	472	Fissura longitudinal no meio da profundidade do FL ao longo do comprimento.
VA-16	12	22	480	Não foram observadas lesões.
VA-17	13	21.5	480	Triturado por FS a 30 cm da cabeça B, até um comprimento de 60 cm.
VA-19	13	21	480	Não foram observadas lesões.
VA-18	Podridão generalizada			
VA-20	12	20	480	Não foram observadas lesões.
VA-21	11.5	20	480	
VA-22	11.5	21	480	Fendas e fissuras longitudinais descontínuas por FL ao longo do vão da viga na metade inferior da profundidade.

				Triturado por FS a partir de 160 cm da cabeça A, até um comprimento de 200 cm.
VA-23	15	20	299	Desfibramento superficial no terço superior do FL, da cabeça B até 40 cm de comprimento.
VA-24	14	19.5	297	Não foram observadas lesões.
VA-25	15.5	20	306	
VA-26	18	20	305	Desfiado em toda a borda superior do FL.
VA-27	17	20	305	Rachaduras longitudinais por FS em toda a luz.
VA-28	15	20	310	Amolecimento e desfibramento por FS, em todo o comprimento. Fissuras longitudinais descontínuas pelo FL.
VA-29	14.5	20	310	Desfiado na cabeça A e B pelo FS até um comprimento de 40 cm respectivamente.
VA-30	14.5	20	310	Triturado por FS afetando 3 cm de profundidade ao longo de todo o comprimento.
VA-31	16.5	20	362	Lascado por PI a 60 cm da cabeça B. Desfibramento superficial em BS do FL.
VA-32	11	21	361	Não foram observadas lesões.
Abreviaturas usadas: PI: parte inferior FL: face lateral FS: face superior BS: borda superior				

Tabela 2. Classificação visual de vigas de madeira.

Qualidade visual (UNE 56544, 2011)	Número de vigas
ME-1	4
ME-2	7
Rejeição	21

A inspeção visual permitiu determinar a extensão do dano na superfície, mas não sua profundidade na massa da madeira, exceto nos casos em que a podridão está muito avançada. Lesões por podridão ou trincas profundas no interior das vigas podem levar à perda da capacidade de carga do elemento e causar sua fratura.

Conforme nos (Nuere, 2007), casos em que a deterioração possa levar à invalidação do elemento para cumprir a função estrutural que lhe foi atribuída no conjunto, deve decidir-se pela substituição ou reforço das vigas. A aplicação desses critérios a cada feixe dependerá da análise conjunta das lesões visíveis e dos resultados obtidos por técnicas não destrutivas (Tabela 3). A remoção de um elemento de madeira exigirá necessariamente a sua substituição por outro de dimensões semelhantes que atenda aos requisitos de classificação visual e classe de resistência, de modo a não afetar os requisitos de carga para o projeto.

3.1 Aplicação de ensaios não destrutivos

Para a realização dos testes de penetrômetro e VPU, foram preparados dois pontos em cada viga. Em cada uma, foram registradas 5 leituras, totalizando 10 resultados para cada elemento. A Figura 12 mostra um resumo dos valores em algumas das vigas testadas.

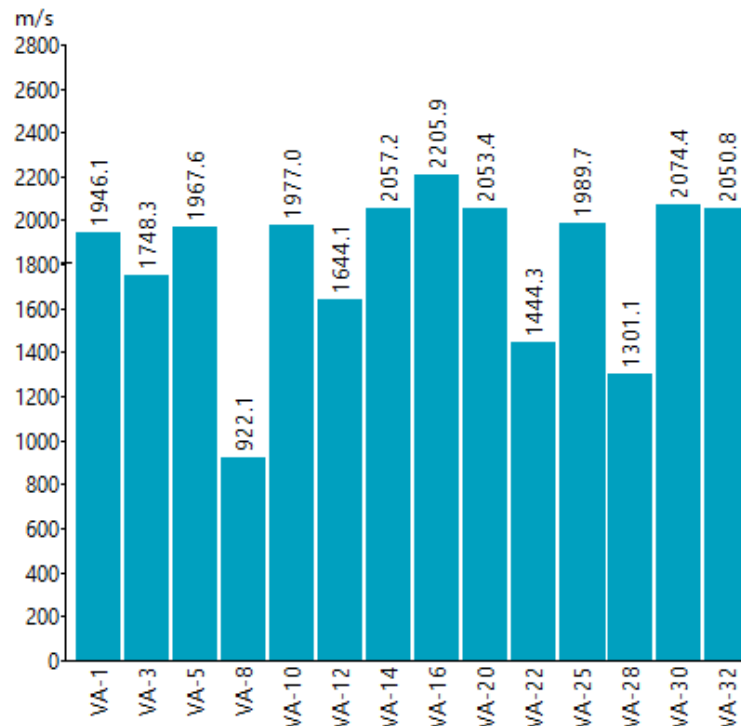


Figura 12. Resumo das medições VPU em um ponto de teste para as vigas de madeira. Dados extraídos do software Proceq PunditLink

Os critérios para estimar a deterioração da madeira com base nos resultados do VPU foram estabelecidos de acordo com (Liñán et al., 2011), em que se estabelece que:

VPU > 1400 m/s: madeira saudável (MS)

VPU < 1400 m/s: madeira deteriorada (MD)

Tabela 3. Resultados médios de medições e cálculos aplicados.

ID	w (%)	Tp (mm)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	VPU ₁₂ (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)	Critério
VA-1	13.3	10.5	10.4	0.45	2011.58	24.34	1804.33	MS
VA-2	12.3	10.0	10.0	0.46	2143.33	27.13	2101.57	MS
VA-3	11.8	12.0	12.0	0.40	2020.32	24.52	1642.40	MS
VA-4	14.3	12.0	11.8	0.41	1972.75	23.51	1587.83	MS
VA-5	17.9	9.5	9.1	0.48	1930.15	22.61	1792.52	MS
VA-6	13.7	9.5	9.4	0.47	2108.75	26.40	2105.94	MS
VA-7	15.8	9.5	9.2	0.48	2565.00	36.07	3140.70	MS
VA-8	15.2	10.5	10.3	0.45	921.20	1.22	381.70	MD
VA-9	19.9	11.3	10.7	0.44	2147.25	27.21	2022.57	MS
VA-10	12.2	10.7	10.7	0.44	1865.80	21.25	1526.17	MS
VA-11	14.6	9.0	8.8	0.49	2043.00	25.00	2038.96	MS

VA-12	18.1	12.3	11.8	0.41	1733.55	18.44	1228.72	MS
VA-13	17.8	10.7	10.3	0.45	2375.50	32.05	2538.05	MS
VA-14	14.9	12.3	12.1	0.40	2101.05	26.23	1771.94	MS
VA-15	15.6	11.7	11.4	0.42	2019.70	24.51	1708.71	MS
VA-16	19.3	11.0	10.4	0.45	2336.25	31.22	2429.38	MS
VA-17	15.7	12.0	11.7	0.41	2273.55	29.89	2125.43	MS
VA-18	Feixe descartado devido à deterioração avançada							
VA-19	17.0	10.3	9.9	0.46	2126.00	26.76	2072.85	MS
VA-20	15.4	10.3	10.1	0.46	2066.10	25.49	1944.34	MS
VA-21	15.6	11.0	10.7	0.44	2126.20	26.77	1977.26	MS
VA-22	14.4	10.7	10.5	0.44	1485.10	13.18	976.75	MS
VA-23	14.4	10.0	9.8	0.46	2165.10	27.59	2163.45	MS
VA-24	13.1	9.3	9.2	0.48	1995.55	24.00	1903.02	MS
VA-25	12.0	10.7	10.7	0.44	1996.20	24.01	1745.33	MS
VA-26	13.2	10.0	9.9	0.46	2073.90	25.66	1975.23	MS
VA-27	16.2	10.7	10.4	0.45	2015.70	24.42	1814.24	MS
VA-28	18.4	12.7	12.1	0.40	1397.50	11.32	779.66	MD
VA-29	15.7	11.7	11.4	0.42	1960.35	23.25	1610.61	MS
VA-30	14.5	11.7	11.5	0.42	2193.75	28.20	2004.15	MS
VA-31	14.6	12.0	11.8	0.41	1914.30	22.27	1497.63	MS
VA-32	13.9	9.7	9.6	0.47	1960.15	23.25	1800.43	MS

Nos resultados de VPU obtidos, apenas duas vigas (VA-8 e VA-28) apresentam valores inferiores ao limite estabelecido de 1400 m/s, sendo classificadas como “madeira deteriorada”. Isso pode ser devido à infestação de fungos por apodrecimento, amolecimento e lascamento na madeira que se espalhou nas vigas, o que se reflete na saída da velocidade de transmissão da onda entre os transdutores. Ao longo dos anos de exploração do imóvel, não é possível determinar as causas pelas quais estas vigas sofreram uma deterioração consideravelmente maior do que as restantes. É possível que a sua localização tenha coincidido com a de zonas húmidas como casas de banho ou cozinhas, embora os teores de humidade registados não apresentem valores extremos que suportem esta hipótese. A análise estatística dos dados (Tabela 4), em que foram excluídos os feixes VA-8 e VA-28, mostra uma dispersão para VPU inferior a 10%, com confiabilidade de 95%, de modo que para o restante dos valores a população de dados obtidos é aceita.

Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados obtenidos en las vigas clasificadas como MS.

Parâmetros estatísticos	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	VPU, 12 (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)
Xmed	15.1	10.8	0.4	2059.5	25.4	1898.3
sd	2.1	1.0	0.0	197.3	4.2	400.3
CV(%)	14.0	9.2	5.8	9.6	16.5	21.1
Min.	11.8	9.0	0.4	1485.1	13.2	976.8
Max.	19.9	12.3	0.5	2565.0	36.1	3140.7

A densidade mínima das vigas foi de $0,4 \text{ g/cm}^3$. Isso corresponde a uma classificação de classe de resistência superior a C35, de acordo com (Documento Básico SE-M, 2019). Os resultados de VPU inferiores a 1400 m/s obtidos para VA-8 e VA-28 inferem que a deterioração por podridão e fissuras se estende para o interior do elemento. No entanto, seus resultados de profundidade de penetração não foram significativos em comparação com as demais vigas.

Isso mostra que a estimativa do estado de conservação da madeira com base na densidade calculada pelo penetrômetro, pode levar a falsos positivos se não for combinada com outras técnicas de medição. A dureza da madeira no ponto de impacto da agulha pode resultar em um valor alto que não reflete a deterioração no interior do material. A Figura 13 mostra a análise geral dos resultados que correlacionam o teor de umidade/penetração/densidade calculada. Nos casos de VA-9 e VA-16, identifica-se como atingem um valor de penetração $\geq 11,0 \text{ mm}$ para umidade próxima a 20%, no qual seria esperado um amolecimento da madeira que resultaria em maior penetração, como acontece com o VA-28. A comparação do teor de umidade entre essas vigas é muito semelhante, mas com resultados opostos. No caso de VA-9 e VA-16 não apresentaram lesões e mantiveram VPU maior que 2000 m/s, enquanto que em VA-28 o avanço das lesões para o interior do feixe foi confirmado com resultados de PUV inferior a 1400m/s.

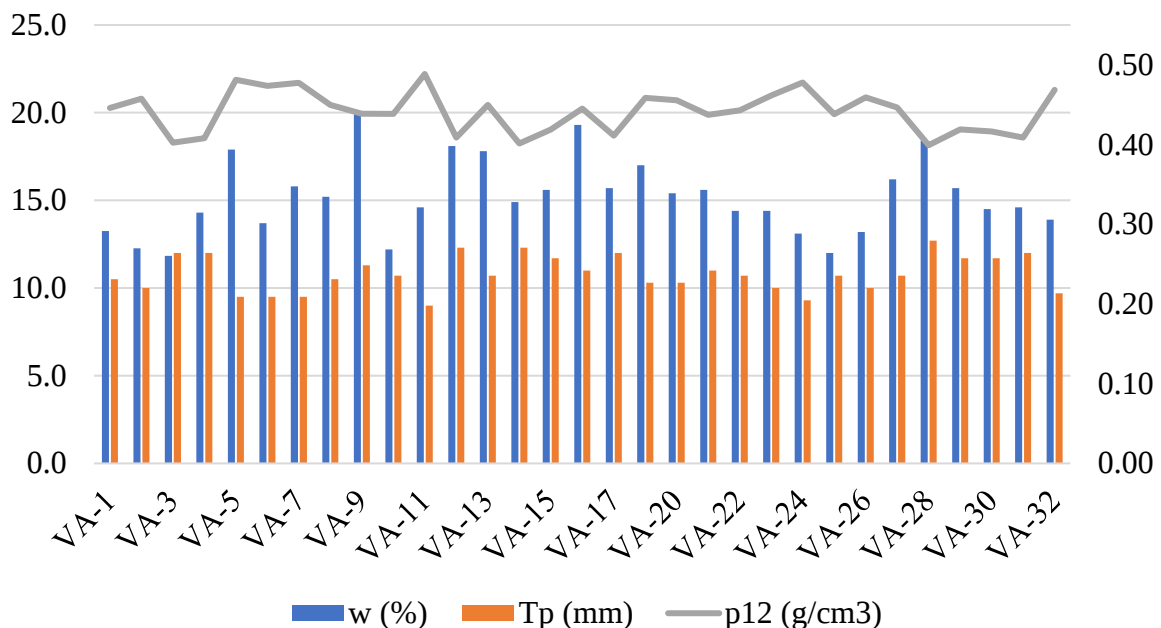


Figura 13. Relação dos resultados de umidade, penetrômetro e densidade calculada a 12% para todas as vigas de madeira estudadas

Do total de medições de VPU realizadas, 82% oscilou em uma profundidade de penetração entre 9,0 mm e 12,0 mm. Na análise gráfica (Figura 14) pode-se observar como o conjunto majoritário de resultados ocupa a faixa entre 1800 m/s e 2400 m/s para o referido intervalo. O gráfico permitiu identificar o feixe VA-22 como uma variável distante da média populacional com resultado de VPU= 1485,10 m/s. Se forem levados em conta o desvio padrão calculado e as lesões presentes na viga, seria razoável por razões de segurança estrutural substituí-la por uma nova. Os valores obtidos das equações propostas para estimar o f_k e o MED apresentam uma alta correlação entre eles (Figura 15), caracterizando as vigas na classe estrutural ME-2 (UNE 56544, 2011), sobre as quais devem aplicar todos os ações de restauração e consolidação necessárias para sua reutilização.

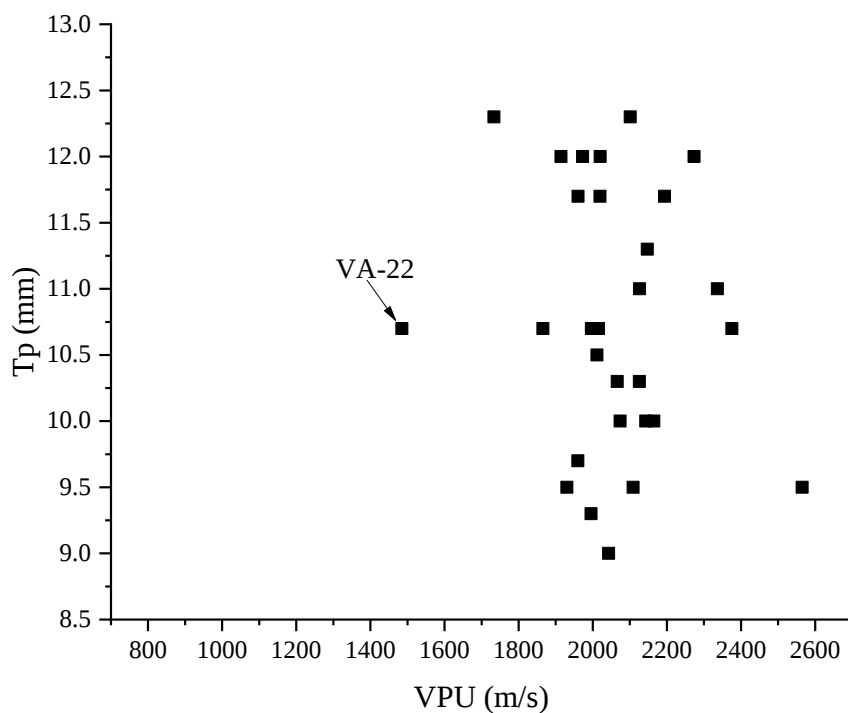


Figura 14. Relação dos resultados de VPU vs Tp para as vigas avaliadas como Madeira Sadia

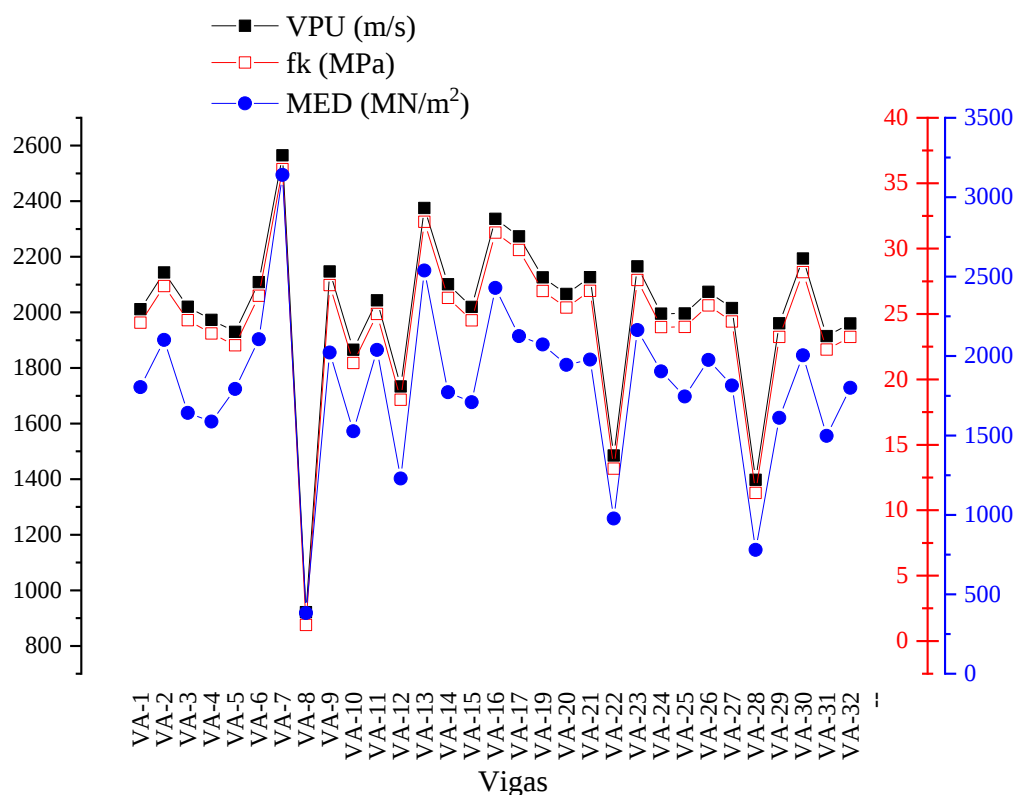


Figura 15. Correlação dos resultados obtidos de VPU, fk e MED para vigas de madeira

3. CONCLUSÕES

Das 32 vigas diagnosticadas para avaliar a sua possível reutilização como madeira estrutural na reabilitação do imóvel, chega-se às seguintes conclusões:

As lesões mais recorrentes encontradas durante a inspeção visual foram a deterioração das cabeças por excesso de umidade nas juntas, devido ao desenvolvimento de fungos podres, além de fissuras e rachaduras descontínuas nas faces e bordas. Entre as técnicas de restauração e reforço mais comuns para esses tipos de deterioração estão o uso de tampas e suportes metálicos para garantir a fixação das vigas nos pontos de apoio. Decapagem ou escovação das faces e bordas até atingir uma superfície com o menor número possível de lesões. As fissuras, por outro lado, podem ser seladas com resinas, ou a partir da preparação de uma pasta de cola de carpinteiro misturada com serragem. Fumigação e tratamento com produtos biocidas e, finalmente, o recálculo estrutural para as novas dimensões das vigas.

O estudo combinado de avaliação visual e ensaios não destrutivos permitiu identificar que as vigas VA-8, VA-18, VA-22 e VA-28 devem ser substituídas devido a lesões avançadas e baixa densidade para serem reutilizadas como elemento estrutural.

A regulamentação atual para a classificação visual da madeira serrada para uso estrutural é muito conservadora no que diz respeito à deterioração, o que pode resultar na substituição total de elementos de madeira antigos. Nos projetos de reabilitação e conservação de bens patrimoniais, a avaliação do estado de conservação é mais eficaz através da aplicação de ensaios de medição nas peças de madeira.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, a técnica VPU apresentou resultados mais precisos com relação à condição de densidade da madeira em comparação com a técnica penetrômetro, na qual, através das equações utilizadas, não se refletiu nas densidades para variações de teor de umidade. entre 11,8% e 19,9%.

4. OBRIGADO

El presente estudio fue financiado por el Grupo Inversionista Avenida del Puerto, perteneciente a la Dirección de Inversiones de la OHCH bajo contrato S-No. 4DG /2021 al Contrato 6DG/2020. Los autores desean agradecer el apoyo de los técnicos Lázaro Y. Martínez García y Raúl de Jesús Expósito Mendez, así como reconocer la labor y colaboración de los obreros y carpinteros de la obra.

5. REFERÊNCIAS

- Alquicira, I. M., Castellanos, J. R. S. (2021), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de Pinus pseudostrobus*. Madera y Bosques, 27(3): e2732235-e2732235. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J. I. (2006), *Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*. Holz als Roh-und Werkstoff, 64(5): 357-362. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0100-5>
- Bratasz, L., Rachwal, B., Kozłowski, A., Kozłowski, R. (2010). *Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects, Wood science for conservation of cultural heritage-Braga 2008 : proceedings of the international conference held by Cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 November 2008. - (Proceedings e report ; 67)*. Firenze University Press, Firenze.

- DIN EN 338:2016-07. (2016). *Structural timber - Strength classes*. Germany. <https://dx.doi.org/10.31030/2463437>.
- Documento Básico SE-M. (2019). *Seguridad Estructural. Madera*.
- Ettelaei, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z., Ebrahimi, G., (2018), *Prediction of Modulus of Elasticity of Poplar Wood Using Ultrasonic Technique by Applying Empirical Correction Factors*. Measurement. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.076>
- ISO 9709:2018. (2018). *ISO 9709:2018(en) Structural timber — Visual strength grading — Basic principles*.
- Kuklík, P. (2007). *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Manavella, R. D., Guillaumet, A. A., Filippetti, M. C., Meyer, L. C. (2019), "*Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa*". 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.
- Nuere, E., (2007), *Madera, en restauración y rehabilitación*. Informes de la Construcción, 59(506): 123-130.
- Rello, L. A., Barra, R. D., Sanz, M. C., Fernández, A. L., Sánchez, M. T .L., Basterra, A. (2007). *Clasificación de madera estructural de P. pinaster Ait. Mediante ultrasonidos*, Congreso Iberoamericano de productos forestales - Iberomadera, Buenos Aires, Argentina.
- Salazar, D. V., Delgado, J. C., Yoza, L. Y., Mallque, M. A. (2018), *Propuesta metodológica para la evaluación de estructuras de madera en monumentos históricos – Caso Hotel El Comercio*. Revista Forestal del Perú, 33(2): 117-132. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i2.1225>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de Pinus douglasiana, en relación a su contenido de humedad*. Revista de Ciencia y Tecnología(23): 25-30.
- Szostak, B., Trochonowicz, M., Kowalczyk, M. (2020), *Determination of the strength parameters of pinewood based on the non-destructive sclerometric test with a wood hammer*. Civil and Environmental Engineering Reports, 30(1): 43-52. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0004>
- UNE 56544. (2011). *Norma Española UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Madrid. España.
- Zielińska, M., Rucka, M. (2021), "*Using the ultrasonic tomography method to study the condition of wooden beams from historical building*". 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC). International Institute for Conservation of Historic And Artistic Works.