



Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís

A. Hernández Oroza^{1*} , A. Diomedes Almeida¹, A. Romeo Sáez¹, P. R. Cuétara Pérez¹ 

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

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

Recepção: 11/01/2022 | Aceitação: 20/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

RESUMO

Para a restauração dos pisos de madeira do Convento de Santa Clara, foram aplicados ensaios de resistografia não destrutiva e penetrometria, estudos biológicos da madeira e técnicas geomáticas para análise de deformação e dimensionamento das vigas. No presente trabalho, os resultados do diagnóstico mostraram que 65% da laje de 98 vigas é afetada por podridão e organismos xilófagos. Estudos de densidade por comparação com valores de referência, mostraram uma perda na dureza da madeira. Os resultados concluem na necessidade de substituição de 17 vigas, e do reforço dos pés direitos e secções de vigas deslizantes.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, diagnóstico, edificações, patrimônio, geomática.

Citar como: Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R. (2022), “Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 296 – 310, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

¹Departamento 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 e a realização de ensaios na obra (100%), a redação do texto (50%), a discussão dos resultados (100%) e a revisão (50%). O autor A. Diomedes Almeida contribuiu com o projeto da investigação e a realização de ensaios em obra (100%), redação do texto (20%) e revisão (25%). O autor A. Romeo Sáez contribuiu para a investigação biológica (100%), redação do texto (20%) e revisão (25%). O autor P. R. Cuétara Pérez contribuiu com o levantamento com escâner laser e processamento digital 3D/ortoimágenes (100%) e redação do texto (10%).

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.

Diagnosis and solutions proposal to the damages present in the ceiling of the Convent of Santa Clara de Asís

ABSTRACT

For the restoration of the wooden ceilings of the Convent of Santa Clara, resistography and penetrometer tests, biological studies of the wood, and geomatic techniques for analysis of deformation and dimensioning of the beams were applied. In the present work, the results of the diagnosis showed that 65% of 98 beams is affected by rot and the presence of xylophagous organisms. Density studies by comparison with reference values, showed a loss in the hardness of the wood. The results conclude in the need to replace 17 beams, and the reinforcement of the wood pillars and sections of sliding beams.

Keywords: non-destructive testing, diagnosis, buildings, heritage, geomatics.

Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado de Convento de Santa Clara de Asís

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es diagnosticar y proponer solución a las lesiones presentes en los forjados de madera del Convento de Santa Clara. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos de resistografía y penetrómetro, estudios biológicos a la madera, y técnicas geomáticas para análisis de deformación y dimensionamiento de las vigas. Los resultados del diagnóstico demostraron que el 65% del forjado compuesto de 98 vigas, está afectado por pudrición y organismos xilófagos. Los estudios de densidad mediante comparación con valores de referencia, mostraron pérdida en la dureza de la madera. Los resultados concluyen que la restauración implica la necesidad de sustituir 17 vigas, y el refuerzo de los pies derechos y secciones de vigas de corredera.

Palabras clave: ensayos no destructivos, diagnóstico, edificaciones, patrimonio, geomática.

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.04-2013-0111717330300-203, 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 conservação de edifícios patrimoniais continua a ser um dos problemas mais complexos no campo da construção hoje. Como consequência dos séculos de exposição, essas estruturas foram submetidas à influência dos efeitos das mudanças climáticas e do aumento da atmosfera de gases corrosivos (SO₂, NO_x, O₃), que levou a uma deterioração acelerada de seus materiais constituintes (pedra, metal, madeira) devido a reações químicas, colonização biológica e formação de crostas negras (Kherais et al., 2021; Kumar and Imam, 2013; Sesana et al., 2021). Isso pode significar um risco significativo para a durabilidade do patrimônio cultural, que deve ser devidamente avaliado por um grupo de trabalho multidisciplinar, apoiado em diferentes técnicas de teste, muitas das quais baseadas em técnicas destrutivas como a extração de tubos de ensaio e a realização de ensadas. No entanto, quando se trata da conservação do patrimônio edificado, este tipo de estudos invasivos deve ser evitado de forma a manter a integridade da obra, dos seus elementos estruturais e, conseqüentemente, do seu valor patrimonial.

Atualmente existem novas técnicas de ensaios não destrutivos (END) que fornecem informações com alto nível de precisão, exatidão, repetibilidade e confiabilidade. As aplicações desenvolvidas são baseadas em diferentes princípios, como eletromagnético (ultrassom, potencial, resistividade), impacto (esclerometria, penetrômetro), geomática (scanner a laser, fotogrametria), emissivo (termografia), entre outros.

A análise quantitativa obtida a partir desses resultados durante o diagnóstico permite identificar as causas das lesões, avaliar o grau de deterioração ou apodrecimento (Liñán et al., 2011) e, em seguida, a tomada das ações corretivas e de conservação necessárias.

O Convento de Santa Clara de Asís foi inaugurado em Havana em 1644, tornando-se o primeiro convento religioso fundado em Cuba. Em 2018, o Escritório do Historiador de Havana (OHCH) iniciou um projeto de restauração e recuperação que envolveu profissionais e estudantes de diferentes ramos das carreiras técnicas e profissionais ligados ao campo da construção e conservação do patrimônio edificado. Os resultados obtidos destas investigações permitiram estabelecer prioridades e metodologias para a sua intervenção e recuperação gradual (Guevara et al., 2019).

O objetivo deste trabalho é avaliar o estado de conservação na estrutura do piso de madeira da galeria de circulação localizada no piso superior do primeiro claustro, para o qual se combinou uma série de ENDs que permitiram identificar as patologias presentes e determinar a magnitude das lesões nas traves e pés direitos que a compõem. Isso implica em uma proposta de solução que é discutida ao final do trabalho.

2. ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

2.1 Identificação do objeto de estudo

A estrutura localiza-se no piso superior do primeiro claustro, em direção ao bloco A (Figura 1). Baseia-se numa laje de madeira e prancha composta por 98 vigas de 9 cm x 13 cm (base x altura), espaçadas entre 43 cm e 45 cm com inclinação de 17 graus da parede para os pés direitos, apoiadas eixo 3 na parede de taipa que compõe a igreja, e ao longo do eixo 4 em uma viga deslizante que repousa sobre 13 pés retos. O feixe deslizante é formado por 12 feixes unidos pelo raio de Júpiter, que repousam sobre os pés direitos (Tabela 1). O telhado é feito de telhas cerâmicas vermelhas.

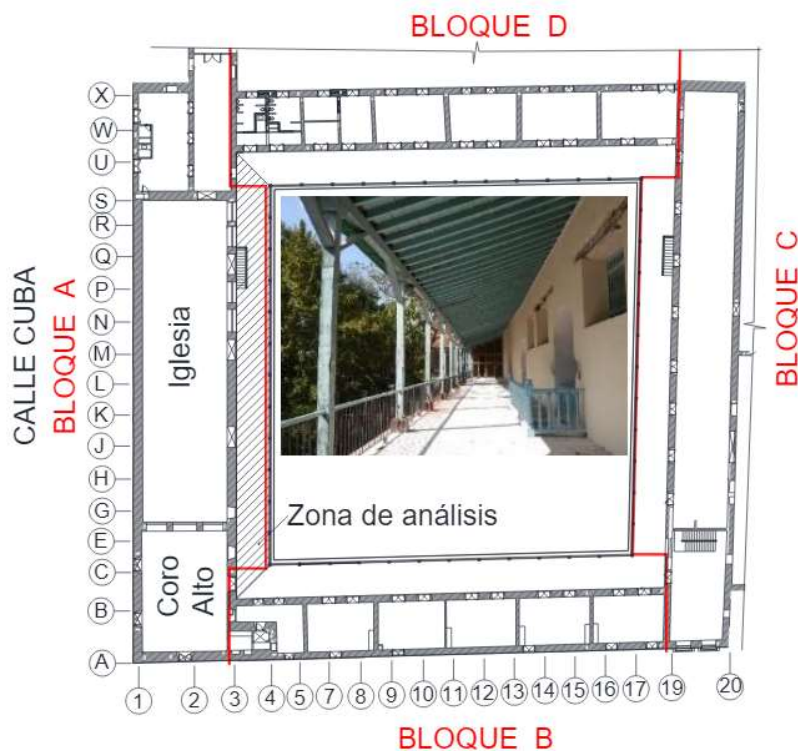


Figura 1. Esboço da planta do primeiro claustro, placas e fotografia da galeria estudada

2.2 Análise e seleção de ensaios não destrutivos

O objetivo do END é determinar a qualidade e integridade do material e seus componentes sem afetar suas propriedades, funções e utilidade por meio de inspeção, medição ou avaliação (Helal et al., 2015; Workman and Moore, 2012). A aplicação deste tipo de técnicas para estudar o estado de conservação de edifícios históricos tem ganhado validade, principalmente devido à vantagem de não necessitar de deterioração adicional nos elementos estruturais do edifício, para conhecer o seu estado de conservação (Binda and Saisi, 2009; Liñán et al., 2011; Ortega and Ripani, 2007). Por ser um material orgânico, a madeira é suscetível a processos de degradação causados por insetos xilófagos, ações mecânicas, exposição ao intemperismo, apodrecimento por fungos ou ação do fogo.

Em edificações patrimoniais, o uso de END agrega alto valor ao estudo diagnóstico, pois os elementos estruturais da madeira não são afetados ou recebem um impacto insignificante. Como resultado, é possível obter informações técnicas com precisão suficiente para estimar o estado de conservação, qualidade e durabilidade da obra ou objeto de trabalho estudado (Hasníková and Kuklík, 2014; Morales-Conde et al., 2013; Palaia et al., 2008).

As técnicas de trabalho aplicadas foram:

- Inspeção visual das lesões presentes em todos os elementos estruturais
- Medição de parâmetros ambientais e umidade superficial de elementos de madeira
- Identificação das espécies de madeira presentes
- Dimensionamento dos elementos de madeira que compõem o piso
- Aplicação de termografia infravermelha
- Detecção de danos internos em madeira por resistografia
- Estimativa de dureza por penetrômetro
- Avaliação estrutural a partir de um modelo 3D obtido com um scanner a laser terrestre (TLS)
- Elaboração de plantas baixas e cortes em plataforma CAD

2.2.1 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva que permite a análise patológica através da emissão de energia térmica pelos materiais. A leitura da radiação emitida na faixa do infravermelho permite interpretar a temperatura do material com base na condutividade térmica ou no calor específico. Dependendo das características e condições de exposição, este material pode reter ou emitir calor. A emissividade é definida pela Lei de Stefan-Boltzman, que afirma que a radiação é proporcional à temperatura do corpo e às propriedades térmicas do material (Morales-Conde et al., 2013). As imagens foram tiradas com uma câmera FLIR E75 e pós-processadas usando o software FLIR Tools.

2.2.2 Resistografia

O resistógrafo é um equipamento especialmente desenvolvido para identificar facilmente áreas com cavidades, deformações, amolecimentos, entre outras lesões na madeira (Ortiz et al., 2017). Foi utilizado um equipamento modelo IML Resi PD400 e os resultados foram processados com o software PD-Tools. A resistografia foi realizada nos elementos selecionados com base nos danos encontrados durante a punção e inspeção visual das lesões. Nas vigas, as medições foram feitas principalmente nas extremidades das vigas que estão embutidas na parede, em três direções: diagonal, horizontal e vertical dependendo das patologias de cada elemento testado. Nos pés direitos, as medições foram feitas na diagonal nas bases para determinar o estado de conservação no suporte, e na horizontal em diferentes alturas, a partir da base com uma separação de 150 mm entre cada ponto de medição resistográfica.







2.2.3 Dureza por penetrômetro Pilodyn

É uma ferramenta que permite estimar a dureza da madeira através da penetração de uma haste de aço de 1,5 mm de diâmetro, a partir de um tiro em direção ao elemento de madeira (Palaia et al., 2008). A profundidade de penetração da haste varia dependendo da densidade do material. Devido ao fato de o resultado obtido ser adimensional, é necessário para sua correta interpretação realizar várias medições no mesmo elemento e referenciá-lo a um espécime de madeira da mesma espécie, em umidade conhecida (Kloiber, 2007; Kuklík, 2007).

2.2.4 Identificação de espécies madeiras

O ensaio foi realizado para conhecer as espécies madeiras presentes nos elementos que compõem a forja da galeria e os montantes que a sustentam. Amostras de 1 cm³ de volume foram retiradas dos elementos de madeira presentes na área de análise. Cortes histológicos foram feitos nas três direções (transversal, tangencial e radial) para observar a disposição dos elementos constituintes por espécie e foram comparados com as descrições anatômicas de referência e as chaves de identificação relatadas e classificadas dentro de uma xiloteca. Os caracteres anatômicos macroscópicos avaliados foram cor, textura, cheiro (naqueles que o possuíam), brilho e presença de anéis de crescimento. As microfotografias foram tiradas com uma câmera digital acoplada a um microscópio Nikon modelo SMZ745. As imagens foram processadas usando o programa IC Capture versão 2.4. As espécies de madeira foram identificadas graficamente usando os seguintes símbolos (Tabela 1).

Tabela 1. Representação gráfica das espécies de madeira identificadas na laje estudada

Ícone/Nome		
 Ácana	 Pinheiro	 Caguairán
 Cedro	 Baría	 Najesí

2.2.5 Levantamento 3D e processamento digital

Foi utilizado o scanner a laser Z+F Imager® 5010c. Foram feitos 11 posicionamentos, com distância média entre cada um de 5 m. No equipamento, a resolução e a qualidade durante a varredura foram configuradas em “Alta” (Alta), além da aquisição de fotos. Esta configuração no TLS implica que a 10 metros do local do emissor, a distância máxima de erro entre os pontos marcados pelo laser é de 6 mm. Com este cronograma de trabalho, o tempo de atraso aproximado é de 8 minutos para cada posicionamento, no qual é obtido um modelo final de pontos com coordenadas *xyz* conhecidas, com seus valores RGB.

2.2.6 Geração de modelos 3D e extração de ortoimagens

Para os diferentes tipos de análises (geométricas, estruturais, etc.), que podem ser feitas em um elemento finito, é necessário obter um modelo 3D que possa ser facilmente manipulável e mensurável por programas convencionais existentes. As informações obtidas a partir de um levantamento 3D fornecem uma descrição quase contínua da superfície escaneada, o que possibilita identificar e quantificar anomalias nos elementos como assimetrias, deformações, descontinuidades, entre outras lesões que podem ser difíceis ou impossíveis de identificar com o olho nu (Tucci and Bonora, 2017). As ortoimagens podem ser extraídas dos modelos 3D, o que permite obter uma projeção ortogonal do modelo de pontos, que tem a mesma validade métrica de um desenho em escala tradicional (Figura 2). Um software comercial baseado em CAD permite a importação da ortoimagem, possibilitando a realização de desenhos precisos que posteriormente podem ser visualizados e analisados em outros ambientes de trabalho digital.



Figura 2. Ortoimagem obtida da galeria do bloco A

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados da inspeção organoléptica

Da viga 1 a 17, o piso é suportado por um sistema de escoramento devido ao risco de colapso devido à deterioração avançada por apodrecimento, bem como à ausência de várias tábuas e rufos. Esta situação ocasionou uma queda no restante da laje e a ruptura de alguns elementos.

A cobertura é afetada pela proliferação de plantas invasoras em toda a galeria, o que leva ao aumento do teor de umidade na madeira, principalmente em épocas de chuva, bem como ao peso adicional que compromete a durabilidade das coberturas. área. O resultado do diagnóstico identificou o apodrecimento como as lesões mais recorrentes, principalmente nas articulações devido à colonização por fungos, desfibramento devido ao ataque de cupins subterrâneos do gênero *Coptotermes*, e falhas de flexão em vigas associadas à perda de capacidade de suporte das feixe elemento.

Os montantes que suportam a laje têm uma base de betão sobre o suporte, que responde a uma intervenção realizada na década de 1980. Na maioria destes, a base encontra-se fissurada em resultado do aumento de volume sofrido pela secção de madeira embutida, como consequência da acumulação de humidade no interior. O concreto não é capaz de absorver as tensões geradas no interior do material devido às variações de volume sofridas pela madeira, o que as faz fraturar.

Alguns pinos estão mais deteriorados do que outros devido ao fato de terem sido utilizadas madeiras de natureza diferente, razão pela qual suas capacidades de absorção e as tensões exercidas variam em cada caso.

3.2 Dimensionamento e deformação a partir de dados TLS

A alta precisão dos dados obtidos pelo scanner a laser a partir da união das nuvens de pontos e da obtenção do modelo 3D, permite que as medições dos elementos da laje sejam realizadas sem a necessidade de intervenção sobre eles. Para trabalhar com cortes representativos do mesmo e do pé direito, foram estabelecidas regiões e as vistas foram ajustadas para obter imagens mensuráveis. No caso do piso de madeira, foi extraída uma seção entre as vigas 35 a 49, enquanto para os elementos de apoio, foi selecionada uma seção das vigas 5 e 6. Os resultados são mostrados na figura 3. resumo das esquadrias é indicado na tabela 2.

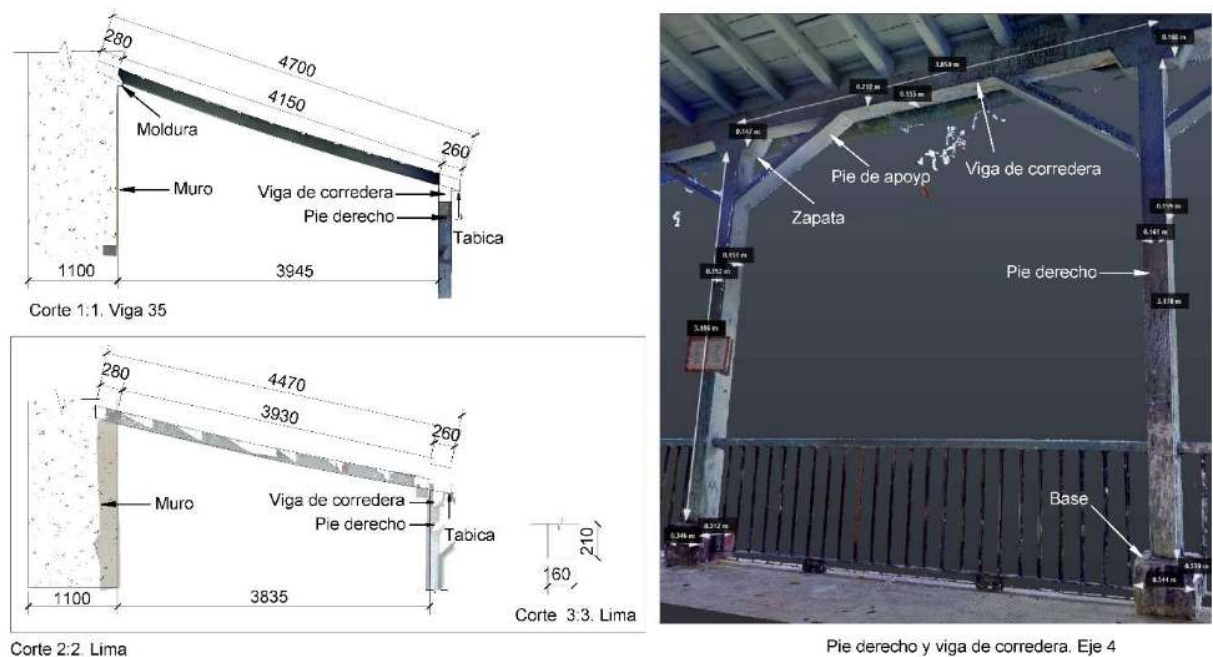


Figura 3. Dimensionamento e deformação (em mm) dos elementos de piso dos modelos 3D

Tabela 2: Dimensões gerais dos elementos do piso

Elemento	Base (cm)	Altura (cm)	Espaçamento (cm)
Feixe	9-10	13	43-45
Tabela	45-48	18-24	-
Piscando	45-48	5-6	31-38
Lima	16	21	-
Feixe deslizante	15-16	21	-
Sapato	15-16	16-17	-
Pé amigo	5	16	-
Pé direito	15-16	334-372	360-370
Base do pé direito	30-40	27-30	-

Para a análise estrutural das vigas da laje, as ortoimagens foram extraídas com o software Reconstructor, e os cortes foram feitos com o software Autodesk Recap da viga número 17 a 98. Todas as vigas que compõem a laje apresentam deformações em maior ou menor grau (seta), e alguns apresentam falhas de flexão devido à diminuição de sua capacidade de carga. A norma cubana (NC 53-179:88, 1988), estabelece que a deflexão máxima admissível é $1/240$ de luz para carga total. Isso indica que a deflexão admissível para as vigas do piso é de aproximadamente 1,5 cm, mas os valores obtidos no local são de 2 cm a 4 cm superiores aos aceitáveis pelo cálculo. A norma estabelece que a deflexão das vigas aumentará para períodos de carga superiores a 10 anos em 50% para madeira seca e 100% para madeira úmida. Considerando isso, a deflexão permitida aumentaria em 2,25 cm e 3,0 cm, respectivamente, para os quais ainda existem diferenças entre os valores permitidos e reais (Figura 4). Importa referir que nem todas as deformações máximas encontradas se situam no centro do vão, devido ao facto de existirem zonas onde o elemento se encontra mais deteriorado do que outros; é por isso que as vigas se deformam e falham na área mais vulnerável. Identificou-se que nem todas as vigas são da mesma espécie de madeira, razão pela qual sua dureza e resistência à flexão também variam. Nos pés 1 e 7 direitos, a deterioração das articulações provocou o deslocamento da mesma e de todos os elementos que a conjugam. Esses movimentos verticais que os pés direitos sofreram variam entre 3,5 cm - 20 cm aproximadamente, e a separação no raio de Júpiter entre os feixes que compõem o feixe deslizante varia entre 1 cm - 2 cm, o que representa deslocamentos consideráveis.

Para avaliar a deformação das vigas e a densidade que apresentam, foi realizada a identificação das espécies de madeira, a partir da coleta de amostras diretamente das vigas e montantes. As espécies de madeira foram identificadas em um laboratório biológico e as densidades obtidas com um penetrômetro foram comparadas com os valores de referência informados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Agroflorestais (INAF).

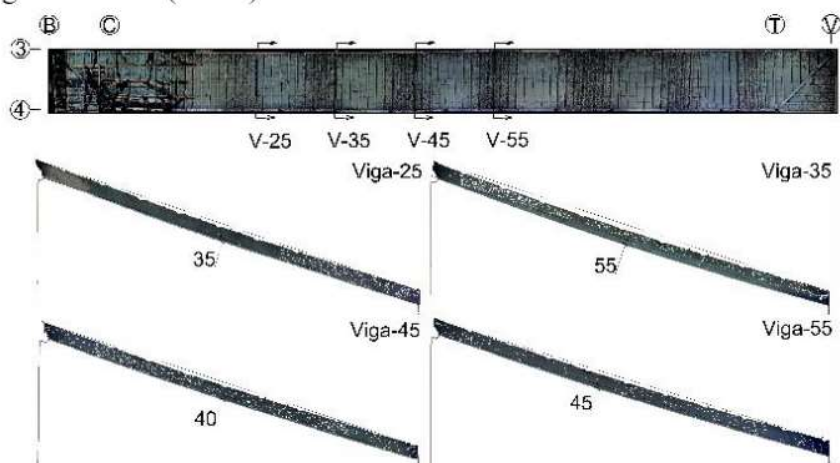


Figura 4. Deformações de algumas vigas de piso (seta em mm)

3.3 Espécies de madeira identificadas

Através da aplicação do método de anatomia comparada a partir dos cortes histológicos feitos nas direções transversal, tangencial e radial, obteve-se como resultado que as espécies de madeira que formam a estrutura do piso e o sistema de sustentação dos pés direitos são: cedro (*Cedrela odorata*), pinheiro (*Pinus sp.*), baria (*Cordia gerascantus*), caguairán (*Guibourtia hymenifolia*) e acana (*Manilkara grisebachii*). A Figura 5 mostra os cortes histológicos feitos para a identificação das espécies de madeira existentes.

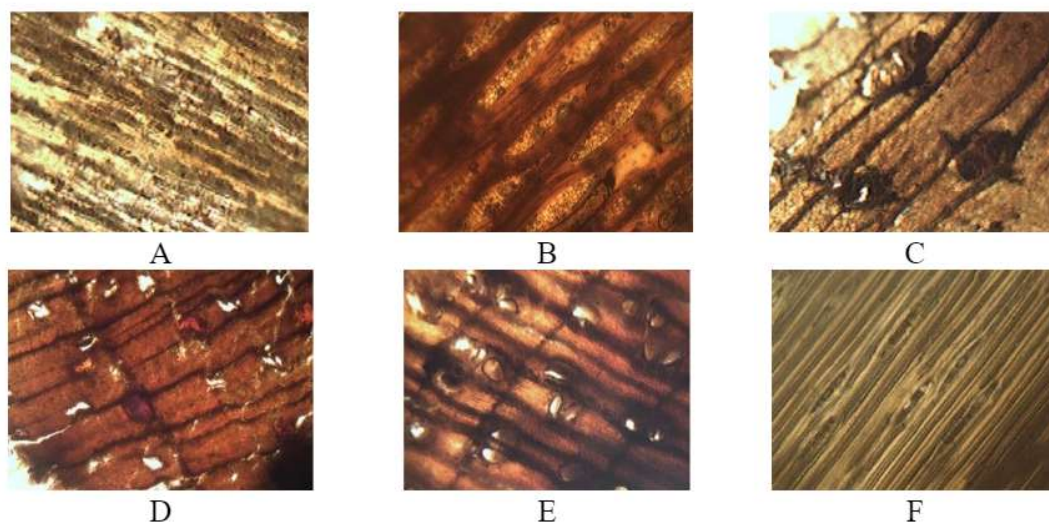


Figura 5. Cortes histológicos em 40x das espécies de madeira identificadas: A- ácana (corte longitudinal), B- baría (corte longitudinal), C- caguairán (corte transversal), D- cedro (corte longitudinal), E-najesí (corte transversal), F- pinho (corte longitudinal)

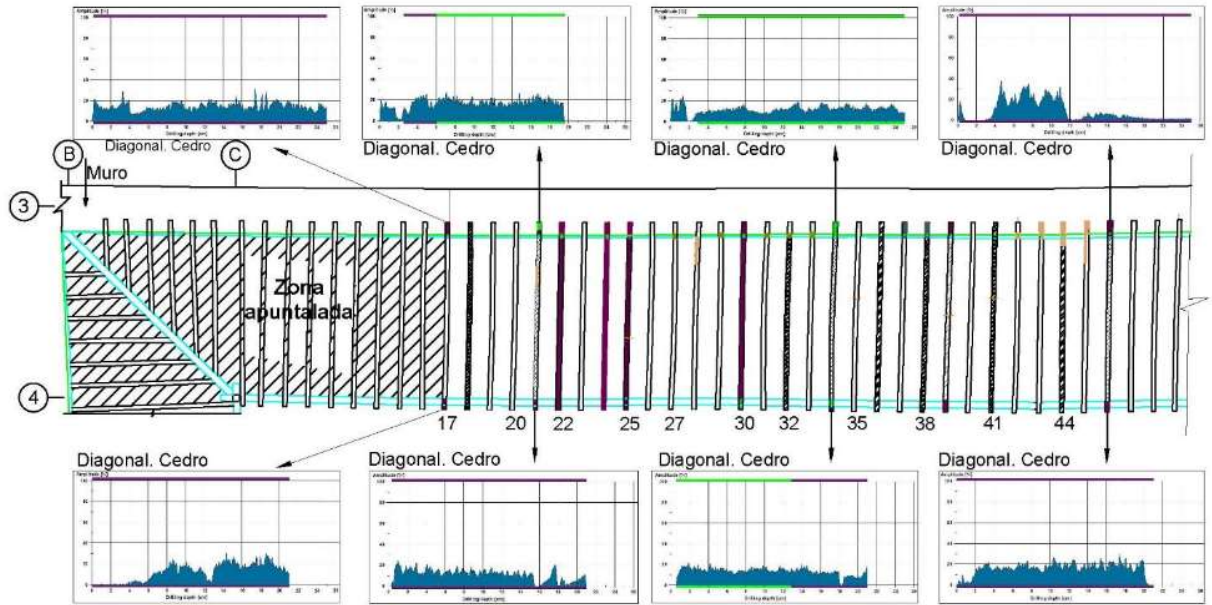
3.4 Análise dos resultados do diagnóstico

O teor de umidade medido nas vigas do piso está entre 9%-19%, nos pés direitos entre 11%-17% e na viga deslizante entre 11%-12%. As imagens termográficas obtidas refletiram como a parede de suporte apresenta áreas de alta umidade, o que favorece a absorção de água na madeira por ser um material higroscópico.

No caso dos montantes e da viga deslizante, os elementos estavam parcialmente molhados porque estão expostos à luz solar e suas condições de secagem e ventilação são mais favoráveis que as das vigas do piso. No entanto, em épocas de chuva e eventos climáticos extremos, essa mesma exposição faz com que a deterioração seja mais acelerada e favorece a proliferação e ataque de organismos degradadores de madeira.

Na análise com a câmera termográfica, foram identificadas variações de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ em diferentes pontos de um mesmo elemento, o que leva a deformações térmicas na laje. No caso das vigas, os valores mais frios encontram-se junto às tábuas e na parede do eixo 3, onde as diferenças mais consideráveis aparecem na zona escorada e junto ao piso. Quando chove, a água se infiltra principalmente pelas áreas onde o sistema de impermeabilização é menos preservado e onde há maior presença de plantas invasoras, o que provoca o acúmulo de água, tanto na laje quanto na parede. O grau de saturação dos elementos da madeira varia de acordo com a espécie, o nível de exposição e as condições ambientais, o que leva ao desencadeamento de processos patológicos que enfraquecem suas propriedades mecânicas. Outras lesões identificadas com a termografia foram variações de temperatura no piso, associadas a desníveis ou danos que favorecem o acúmulo de água da chuva, e favorecem a absorção por capilaridade nos pés direitos da galeria. Estando embutido em uma base de concreto que funciona como uma camada impermeável, a secagem dentro da base é muito ineficiente e acelera o apodrecimento da madeira.

A análise realizada com o resistógrafo permitiu identificar que das 98 vigas que compõem a laje, 64 delas apresentam diferentes manifestações patológicas associadas à deterioração por exposição aos ciclos de molhagem e secagem. A resistografia iniciou-se na zona da junção por ser a zona mais vulnerável, e consoante o dano detetado, foram feitas medições também no centro do vão ou junto aos apoios (Figuras 6 e 7).



Legenda:

- desfibração
- decair
- rachaduras
- amolecimento
- madeira danificada
- madeira saudável

Figura 6. Resultados de ensayos de resistografía y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 1-49

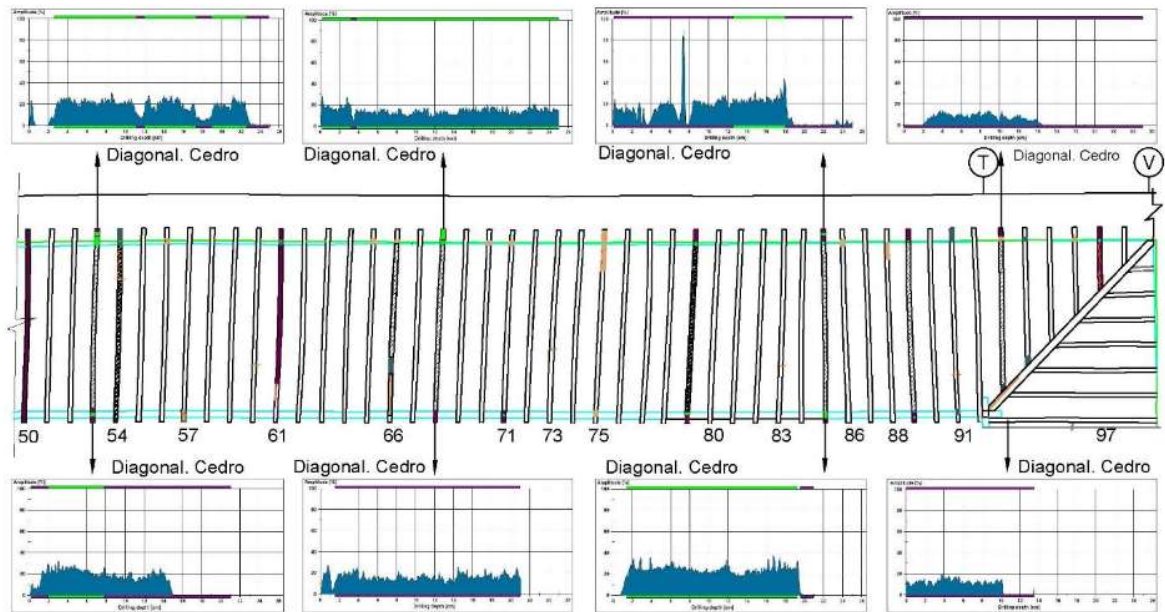


Figura 7. Resultados dos testes de resistografía e lesões em elementos de piso entre vigas 50-98

No caso das pernas direitas, a resistografía mostrou baixos valores de resistência à penetração para todas elas, e anomalias semelhantes às detectadas nas vigas de madeira. A extensão das lesões situa-se entre 150 mm e 750 mm da base de concreto para cima, e em mais de 50% dos pés direitos localiza-se nos primeiros 150 mm de altura.

A viga deslizante, com extensão de 45,5 m, é composta por seções, e cada seção por vigas de diferentes espécies de madeira. Devido ao facto de a zona mais vulnerável ser a face exterior, procedeu-se à resistografia desde a face interior (galeria) até ao exterior (pátio), com o objectivo de identificar a evolução da deterioração com base na largura da viga. No trecho entre o pé direito 8 e 9, a resistografia mostra áreas com desfibramento devido ao ataque de cupins. Esses organismos xilófagos se alimentam da madeira e deixam túneis em seu interior, conseqüentemente, a curva resistográfica muda repentinamente devido à falta de resistência durante seu avanço (Figuras 8 e 9). Ao realizar os testes de penetrômetro e os cálculos de ajuste correspondentes, avaliou-se que os elementos de madeira possuem uma dureza inferior aos valores tabulados para madeiras cubanas. Estes resultados estão em correspondência com as baixas resistências obtidas nos testes de resistografia. A Tabela 3 apresenta uma amostra de alguns dos elementos estudados.

Tabla 3: Resultados del cálculo de la dureza a partir del penetrómetro

Elemento	Localização	Espécies de madeira	Teor de umidade (%)	Penetração 12% de umidade (mm)	Densidade calculada 12% de umidade (g/cm ³)	Densidade tabulada 12% de umidade* (g/cm ³)
Lima	Eixo 3	Pinheiro	14	14	0.35	0.74
Feixe 30	eixo 4	Cedro	13	17	0.27	0.37
feixe 50	Eixo 3	Cedro	13	21	0.16	0.37
pé direito 8	30 cm da base	Pinheiro	14	9.5	0.47	0.74
pé direito 9	30 cm da base	bariá	13	11	0.43	0.84

*- valores de referencia aportados por el INAF

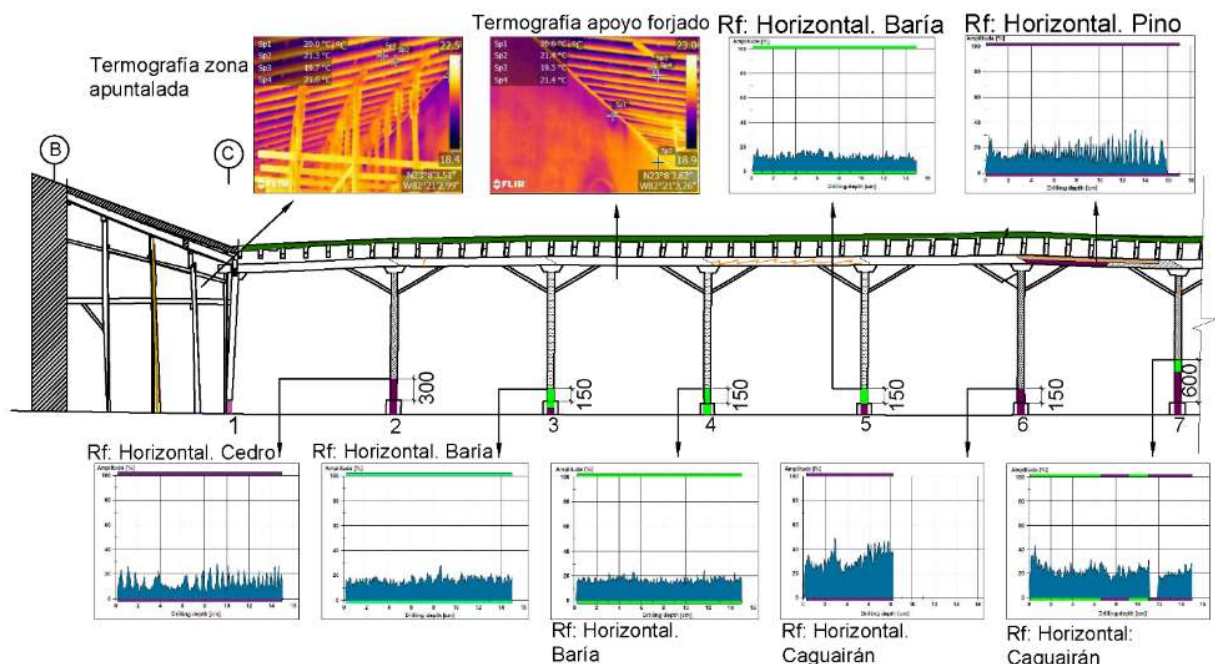


Figura 8. Resultados de ensaios em elementos da laje entre os montantes 1-7, onde a termografia reflete a umidade presente na parede do eixo 3 na área de apoio das vigas, e a resistografia nos montantes e viga deslizante de o eixo 4

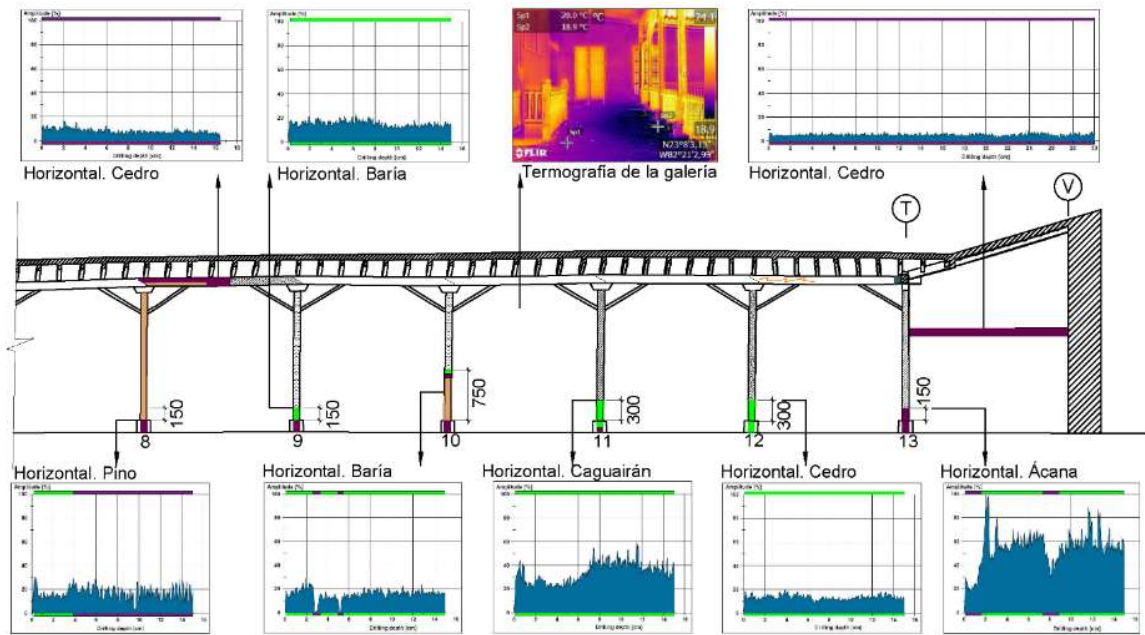


Figura 9. Resultados de ensaios em elementos da laje entre os pés direitos 8-13, mostrando a termografia da galeria com alto nível de umidade nos apoios dos pés direitos, e a resistografia nos pés direitos e viga de deslizamento do eixo 4

3.5 Propostas de solução

Nas vigas de piso, foi determinado que 17 delas precisam ser substituídas devido à sua deterioração avançada. Adicionalmente, outras 45 vigas devem ser reforçadas estruturalmente em diferentes áreas, dependendo das patologias desenvolvidas em cada uma. Das 34 vigas restantes para as quais não foram identificadas lesões significativas, será necessário desmontar e descascar 2 delas por danos superficiais, para posteriormente recalcular a carga para a nova seção da viga (Figuras 10 e 11). Todos os pés direitos apresentaram deterioração que exigiu ações de reforço estrutural, assim como nas vigas deslizantes, onde será necessário substituir dois trechos e reforçar outros 3 trechos (Figuras 12 e 13). A diminuição significativa da densidade da madeira da laje é resultado da exposição aos ciclos de umedecimento e secagem, principalmente nos meses chuvosos, com a consequente proliferação de fungos e infestação de cupins. As deformações presentes nas vigas não são apenas resultado do aumento de peso devido ao excesso de água e ao crescimento das plantas mais altas, mas também pela perda de suas propriedades da madeira, o que aumenta o risco de falha estrutural.

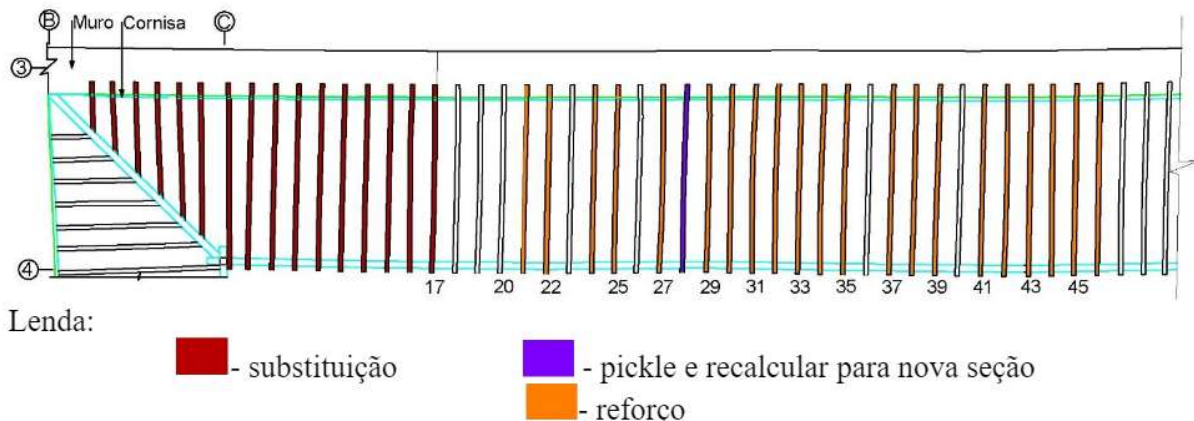


Figura 10. Proposta de solução para o piso entre vigas 1-49

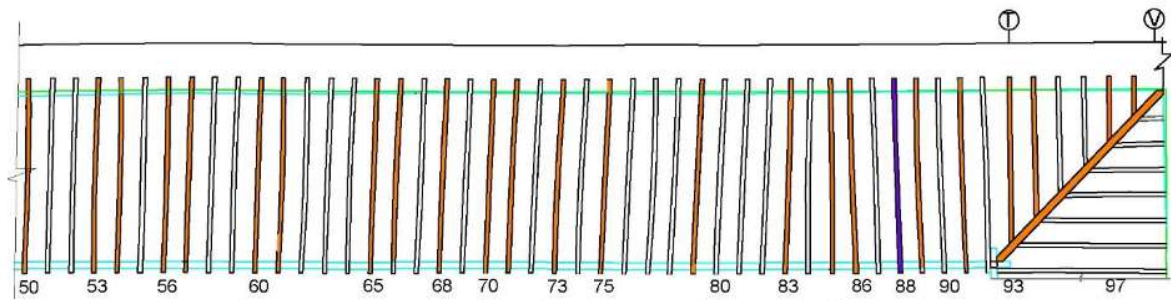


Figura 11. Proposta de solução para a laje entre vigas 50-98

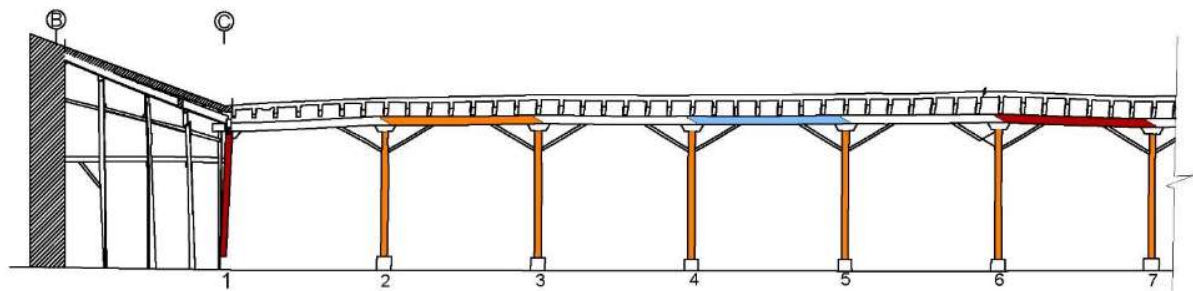


Figura 12. Proposta de solução para os pés direitos 1-7 e seção da viga deslizante

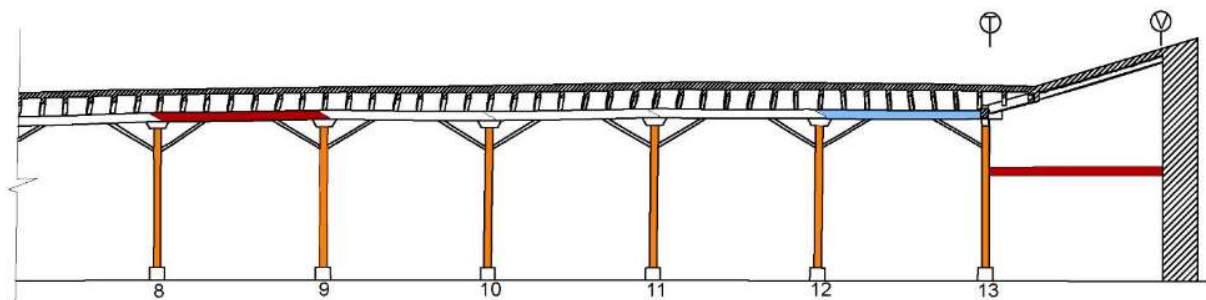


Figura 13. Proposta de solução para os pés direitos 8-13 e seção da viga deslizante

4. CONCLUSÕES

A estrutura do piso de madeira da galeria estudada apresenta deterioração avançada, ocasionada pela deterioração devido ao excesso de umidade devido ao crescimento de plantas invasoras na cobertura. Esta situação levou à colonização por fungos e ao ataque de organismos xilófagos, o que levou a perdas nas propriedades da madeira utilizada,

Estudos de densidade aplicados mostraram afetações na dureza devido à exposição a ciclos de umedecimento e secagem e colonização biológica. Isso levou a deformações nas vigas e uma diminuição da capacidade de carga de seus elementos estruturais.

Como resultado do diagnóstico realizado, foi demonstrada a necessidade de substituição de 17 vigas de suporte da cobertura e o reforço estrutural de outras 45. As pernas direitas terão também de ser reforçadas, sendo que uma delas terá de ser substituída devido à deterioração avançada, bem como algumas seções de vigas deslizantes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao OHCH Patrimonial Rehabilitation Investor Group pelo financiamento desta pesquisa sob o contrato No. S-5AI/2020 Ctto. 22DG/2019. Foi realizado com o apoio da Divisão de Materiais da Tecnalia Research & Innovation Foundation no âmbito do projeto de colaboração FOCAD 2018.

Da mesma forma, agradecemos a participação dos especialistas e técnicos do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa, em particular aos Engenheiros Rafael González Hernández e Dainelys Guerra Bouza por sua considerável contribuição, a todos os técnicos do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa, bem como a à Bióloga Maider Arana da Fundação Tecnalia na elaboração do plano de controle e erradicação de cupins, e da Cooperação Internacional à Ing. Ingrid Alonso Esquivel.

6. BIBLIOGRAFIA

- Binda, L. and Saisi, A. (2009), *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France.
- Guevara, J. L., Toirac, Y. A., Marisy, C. M. C. (2019), *Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención*. Revista ALCONPAT, 9(2): 228-246. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>
- Hasníková, H., Kuklík, P. (2014), *Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure*. Wood research, 59(3): 411-420.
- Helal, J., Sofi, M., Mendis, P. (2015), *Non-destructive testing of concrete: A review of methods*. Electronic Journal of Structural Engineering, 14(1): 97-105.
- Kherais, M., Csébfalvi, A., Len, A. (2021), *The climate impact on timber structures*. International journal of optimization in civil engineering, 11(1): 143-154.
- Kloiber, M. (2007), *"Ensayos no destructivos de las propiedades de la madera"*, Mendel University, Czech Republic, 208 pp.
- Kuklík, P. (2007), *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Kumar, P., Imam, B., (2013), *Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure*. Science of The Total Environment, 444: 85-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>
- 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>
- Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., Rubio de Hita, P. (2013), *Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study*. Advanced Materials Research, 778: 233-242. [10.4028/www.scientific.net/AMR.778.233](http://www.scientific.net/AMR.778.233)
- Norma Cubana (1988), *NC 53-179:88 - Estructuras de madera. Método de cálculo*. La Habana, Cuba.
- Ortega, N. F., Ripani, M. (2007), *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007. Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales (AAENDE), Argentina, pp. 1-12.
- Ortiz, R., Fuentes, N., Jamet, A., Moya, A., González, M., Varela, M. P., Ramírez, A., Adofacci, G., Martínez, P. (2017), *Evaluación resistográfica en elementos de maderas desfibradas de la torre de lixiviación de la oficina salitrera Santa Laura en Chile*. Patrimonio de la Humanidad. Informes de la Construcción, 69(547): 1-6. <http://dx.doi.org/10.3989/id54678>
- Palaia, L., Monfort, J., Sánchez, R., Gil, L., Álvarez, A., López, V., Tormo, S., Pérez, C., Navarro, P. (2008), *"Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-*

destructive testing together with traditional ones". 9th International Conference on NDT of Art. Jerusalem, Israel.

Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021), *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change: e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>

Tucci, G., Bonora, V. (2017), *Towers in San Gimignano: metric survey approach*. Journal of performance of constructed facilities, 31(6). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001085](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001085)

Workman, G. L., Moore, P. O. (2012), *"Nondestructive Testing Handbook 10: Overview"*. American Society for Nondestructive Testing.