



Estratégias de diagnóstico para a reabilitação de estruturas de madeira históricas: O caso do Teatro Francisco Nunes

Diagnostic strategies for the rehabilitation of historic wooden structures: The case of the Francisco Nunes Theatre.

CARRASCO, Edgar¹; ALVES, Rejane²; MANTILLA, Judy³

Mantilla.carrasco@gmail.com¹; Rejanealves.ufes@gmail.com²; judynorka@gmail.com³.

¹Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio sustentável na Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Professora Doutora do Programa de Pós graduação em Engenharia Química na Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Espírito Santo, Brasil.

³ Professora Doutora, aposentada da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Informações do Artigo

Palavras-chave:

Estruturas de madeira
históricas

Diagnóstico estrutural
Reabilitação de edifícios
Ensaio não destrutivo

Key word:

Historic timber structures
Structural diagnostics
Building rehabilitation
Non-destructive testing

Resumo:

A preservação de estruturas históricas em madeira é fundamental para o patrimônio cultural, mas enfrenta desafios devido à vulnerabilidade do material. Este estudo apresenta uma metodologia integrada de diagnóstico, aplicada à cobertura do Teatro Francisco Nunes em Belo Horizonte. Esta abordagem combina três técnicas complementares: inspeções visuais para identificar patologias superficiais, ensaios não destrutivos com resistógrafo para avaliar a condição interna das peças, e modelagem computacional para quantificar esforços estruturais. As inspeções detectaram danos biológicos e deficiências construtivas, enquanto os resistogramas forneceram dados sobre a resistência interna da madeira sem comprometer sua integridade. A análise computacional identificou zonas críticas que requerem intervenção prioritária. A integração destas técnicas permitiu um diagnóstico mais preciso do que seria possível com métodos isolados, orientando intervenções menos invasivas. Os resultados demonstram que a conservação eficaz de estruturas históricas em madeira requer uma avaliação multidimensional que considere tanto aspectos históricos quanto estruturais. Esta metodologia contribui para preservar importantes testemunhos de técnicas construtivas tradicionais, garantindo sua transmissão às gerações futuras.

Abstract

The preservation of historic timber structures is essential for cultural heritage, yet faces challenges due to the material's vulnerability. This study presents an integrated diagnostic methodology applied to the roof structure of Teatro Francisco Nunes in Belo Horizonte. This approach combines three complementary techniques: visual inspections to identify surface pathologies, non-destructive resistograph testing to assess the internal condition of elements, and computational modeling to quantify structural stresses. The inspections detected biological damage and construction deficiencies, while resistograph tests provided data on the

internal resistance of the timber without compromising its integrity. Computational analysis identified critical zones requiring priority intervention. The integration of these techniques enabled a more precise diagnosis than would be possible with isolated methods, guiding lessinvasive interventions. Results demonstrate that effective conservation of historic timber structures requires a multidimensional assessment that considers both historical and structural aspects. This methodology contributes to preserving important testimonies of traditional construction techniques, ensuring their transmission to future generations

1. Introdução

Inaugurado em 1950, o Teatro Francisco Nunes transcende sua função arquitetônica para simbolizar o florescimento cultural de Belo Horizonte em meados do século XX. Concebido durante um período de notável expansão urbana, o teatro foi cuidadosamente integrado ao Parque Municipal, incorporando elementos modernistas característicos daquela época. Embora existam lacunas documentais quanto à autoria específica do projeto, é evidente que sua concepção buscava atender à crescente demanda por espaços dedicados às artes cênicas na capital mineira.

O edifício original distinguiu-se por sua funcionalidade, estética despojada e atenção especial à acústica e visibilidade, empregando materiais que refletiam tanto a disponibilidade quanto as tendências construtivas do período. Ao longo das décadas, o teatro passou por diversas intervenções estruturais e atualizações técnicas, incluindo modernizações nos sistemas de iluminação e sonorização, adaptando-se às exigências contemporâneas sem perder sua essência histórica.

Desde então, o Teatro Francisco Nunes tem ocupado posição central na vida cultural belo-horizontina, acolhendo uma diversidade de manifestações artísticas – de peças teatrais a concertos e festivais. Esta trajetória consolidou o espaço não apenas como palco para apresentações, mas como ambiente de socialização, aprendizado e formação de público, reafirmando seu impacto sociocultural para toda a região.

A proteção do patrimônio edificado, particularmente das estruturas históricas em

madeira, apresenta desafios técnicos e multidisciplinares que vão muito além da mera preservação física [1]. Tais construções constituem testemunhos tangíveis de diferentes períodos históricos, manifestando valores arquitetônicos, estéticos e construtivos únicos, além de técnicas e conhecimentos transmitidos através de gerações [2]. A madeira exerceu papel fundamental na evolução arquitetônica, desde construções vernaculares até complexas obras de engenharia, sendo valorizada por atributos como leveza, flexibilidade e sustentabilidade [3]. No entanto, sua natureza orgânica, combinada com a susceptibilidade a diversos agentes degradantes, torna sua conservação particularmente desafiadora, exigindo abordagens integradas e conhecimentos de múltiplas disciplinas [4].

A relevância da conservação de estruturas históricas em madeira está intrinsecamente ligada à preservação da memória coletiva, ao fortalecimento da identidade cultural e à continuidade do conhecimento técnico acumulado [5]. Esses edifícios estabelecem uma conexão palpável com o passado, proporcionando às comunidades um sentido de continuidade histórica e valorização do patrimônio local [6]. Adicionalmente, a reabilitação dessas estruturas alinha-se com princípios de sustentabilidade, reduzindo a necessidade de novas edificações e minimizando o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos [7]. Assim, a preservação do patrimônio arquitetônico em madeira contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, fomentando um futuro mais resiliente e ancorado na

apreciação do legado histórico como elemento de desenvolvimento [8].

Apesar do crescente reconhecimento do valor patrimonial, a conservação de estruturas históricas em madeira enfrenta obstáculos específicos. Diferentemente de materiais como pedra ou alvenaria, a madeira mostra-se particularmente vulnerável à ação de agentes biológicos – como fungos e insetos xilófagos – e a condições ambientais adversas, incluindo umidade excessiva, radiação solar e oscilações térmicas [9]. Frequentemente, falhas construtivas resultantes de técnicas inadequadas, materiais impróprios e modificações ao longo do tempo comprometem a estabilidade estrutural [10]. A avaliação desses danos requer a integração de conhecimentos em engenharia, arquitetura, biologia e conservação, visando compreender os mecanismos de deterioração e desenvolver estratégias de intervenção apropriadas [11].

Neste panorama, torna-se essencial realizar diagnósticos meticulosos das condições estruturais das edificações históricas em madeira, orientando práticas eficazes de reabilitação [12]. Embora as metodologias tradicionais baseadas em inspeções visuais mantenham sua importância, frequentemente mostram-se insuficientes para detectar deteriorações internas ou ocultas, limitando a eficácia das intervenções [13]. A incorporação de técnicas não destrutivas, como resistogramas, e ferramentas de modelagem computacional representa uma abordagem inovadora para complementar as inspeções convencionais, permitindo obter informações detalhadas sem causar danos adicionais [14]. Contudo, a aplicação destas técnicas em madeiras históricas ainda apresenta desafios significativos, como a adaptação dos métodos para estruturas antigas e a dificuldade de validação dos modelos através de dados experimentais [15].

Diante deste cenário, o presente estudo propõe uma abordagem integrada para diagnosticar a degradação em estruturas históricas de madeira, combinando inspeção visual minuciosa, ensaios não destrutivos e

modelagem computacional, utilizando a cobertura do Teatro Francisco Nunes como caso exemplar. Esta cobertura, estruturada em arco de madeira, representa um notável exemplo da engenharia do período, refletindo as aspirações modernistas por soluções arrojadas em espaços culturais. Ao longo das décadas, entretanto, a estrutura sofreu processos degenerativos devido à ação biológica, exposição à umidade e deficiências construtivas, comprometendo sua integridade e durabilidade.

A análise aprofundada desta obra oferece uma oportunidade única para aprimorar metodologias diagnósticas e desenvolver estratégias de reabilitação mais eficientes, sustentáveis e adaptadas às particularidades do patrimônio em madeira. Ao integrar diferentes técnicas avaliativas, buscou-se ampliar a compreensão do estado estrutural, identificando as causas de degradação, quantificando danos e esforços atuantes, e assim fundamentando intervenções precisas e personalizadas.

A importância desta investigação reside na necessidade crescente de metodologias diagnósticas mais acuradas e eficientes, fundamentais para a reabilitação de estruturas históricas em madeira e para a promoção de práticas construtivas sustentáveis. Ao aplicar múltiplas técnicas analíticas a um caso concreto, este estudo visa gerar conhecimentos aplicáveis, relevantes para profissionais e pesquisadores, contribuindo para enfrentar os desafios inerentes à conservação do patrimônio edificado em madeira – assegurando sua estabilidade, longevidade e significado cultural para as futuras gerações.

2. Materiais e métodos

A estrutura de madeira do Teatro Francisco Nunes representa um notável exemplar da engenharia de meados do século XX. Sua cobertura, em particular, destaca-se pela sofisticação técnica e elegância estética, integrando elementos estruturais de madeira com ligações metálicas, figura 1.

Figura 1 – Teatro Francisco Nunes inaugurado em 1950 dentro do Parque Municipal em Belo Horizonte



Fonte: Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte – ASCOM

2.1 Visão Geral da Estrutura

A cobertura do teatro apresenta uma solução engenhosa composta por arcos de madeira que percorrem toda sua extensão, criando um amplo espaço interno livre de pilares. Estes arcos são formados por lâminas de madeira sobrepostas – não coladas, mas mantidas em posição pela própria curvatura – complementadas por montantes de madeira e diagonais em barras de aço aparafusadas. O sistema estrutural é completado por terças, mãos-francesas e contraventamentos em X, todos em madeira, que servem de apoio para as telhas metálicas.

2.2 Elementos Estruturais Principais

2.2.1 Arcos de Madeira

Os arcos constituem os elementos estruturais fundamentais da cobertura, responsáveis pela distribuição das cargas até os apoios. Cada arco é composto por duas partes: um arco externo (superior) e um arco interno (inferior). Cada um destes é formado por quatro lâminas de madeira com 2,3 cm de espessura, empilhadas sem colagem. As lâminas são arqueadas por aprisionamento,

mantidas em posição pelo sistema de montantes de madeira serrada e barras de aço rosqueadas, figura 2.

Figura 2 – Vista geral da cobertura, mostrando os arcos de madeira e as telhas metálicas



Fonte: Autores

2.2.2 Montantes e Diagonais

Os montantes de madeira (7 cm × 7 cm) e as barras de aço rosqueadas (12,5 mm de diâmetro) trabalham em conjunto para manter as lâminas dos arcos posicionadas e garantir sua estabilidade. As barras diagonais de aço funcionam como contraventamentos, aumentando a rigidez global da estrutura, figura 3.

Figura 3 – Detalhe da ligação entre os montantes de madeira e os arcos, mostrando as barras de aço rosqueadas



Fonte: Autores

2.2.3 Terças, Mãos-Francesas e Contraventamentos

As terças são peças de madeira apoiadas sobre os arcos que servem de suporte para as

telhas metálicas. Mãos-francesas de madeira serrada (4 cm × 6,8 cm) contraventam o arco interior contra flambagem. Contraventamentos em X, também de madeira, contribuem para a estabilidade lateral do conjunto.

2.3 Ligações e Apoios

Os arcos são fixados aos apoios de concreto por meio de dois parafusos de 1/2". A conexão entre montantes e arcos é realizada através de parafusos e barras rosqueadas. A correta fixação destes elementos é importante para a estabilidade e segurança da estrutura, figura 4.

Figura 4 – Detalhe do apoio dos arcos em concreto, mostrando os parafusos de fixação



Fonte: Autores

2.4 Materiais Utilizados

A estrutura é predominantemente construída em madeira, com elementos de ligação em aço. A madeira utilizada enquadra-se na Classe de resistência C30 Dicotiledônea, conforme a norma brasileira [16]. O aço empregado é do tipo ASTM 325, com características mecânicas especificadas pela norma [17].

2.5 Estado de Conservação

Nossas inspeções visuais revelaram diversos problemas, incluindo danos biológicos causados por fungos e cupins, além de defeitos construtivos como desalinhamento de elementos estruturais e ausência de contraventamentos. Estes danos comprometem a integridade do conjunto e demandam intervenções de reabilitação. A

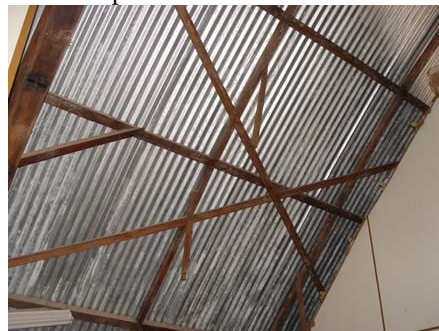
figura 5 ilustra um exemplo de dano biológico em elemento estrutural, enquanto a figura 6 mostra o desalinhamento de um contraventamento.

Figura 5 – Exemplo de dano biológico em um elemento estrutural, possivelmente causado por fungos ou insetos.



Fonte: Autores

Figura 6 – Desalinhamento de um contraventamento, comprometendo a sua eficácia



Fonte: Autores

2.6 Equipamentos utilizados

Para as inspeções visuais, empregou-se uma câmera fotográfica Canon EOS Rebel T7i com lente de 18-55mm, essencial para documentar detalhadamente as condições estruturais, incluindo danos e deformações. Uma trena laser Bosch GLM 50 C permitiu medições precisas, fundamentais para a posterior modelagem.

Nos ensaios não destrutivos, utilizou-se principalmente o Resistógrafo IML-RESI F400, equipamento que mede a resistência da madeira à penetração de uma broca fina, gerando um perfil da densidade e integridade do material em profundidade. A broca de 3 mm de diâmetro possibilitou avaliações precisas sem comprometer significativamente

a estrutura. Os dados coletados foram analisados através do software IML-RESI, que permitiu identificar áreas com menor resistência, indicativas de degradação interna.

Para a modelagem computacional, o software SAP2000 foi utilizado na criação de um modelo detalhado da cobertura e na simulação de seu comportamento sob diferentes condições de carregamento.

2.7 Metodologia de diagnostico

A avaliação da cobertura de madeira do Teatro Francisco Nunes seguiu uma metodologia integrada em três etapas principais: inspeções visuais detalhadas, ensaios não destrutivos (resistogramas) e modelagem computacional. Cada etapa foi cuidadosamente planejada e executada para fornecer uma compreensão abrangente do estado da estrutura, permitindo identificar patologias, avaliar a resistência da madeira e verificar a integridade estrutural da cobertura.

A primeira etapa da avaliação consistiu em inspeções visuais minuciosas de todos os elementos da estrutura da cobertura. O objetivo principal foi identificar a presença de danos bióticos e abióticos. Os danos bióticos são ocasionados por fungos e organismos Xilófagos, é um dos principais problemas que afetam as estruturas de madeira históricas. Os fungos causam a deterioração da madeira, alterando a sua cor, textura e resistência. Os insetos xilófagos, como os cupins e os carunchos, alimentam-se da madeira, escavando galerias e comprometendo a sua integridade estrutural. As inspeções visuais permitem identificar os sinais da presença destes agentes biológicos, como a presença de orifícios, galerias, pó de madeira e corpos frutíferos. Os danos abióticos são os defeitos construtivos, deformações visíveis, rachaduras e fissuras na madeira, nós soltos ou defeituosos, empenamentos e deformações, desalinhamento de elementos estruturais, ausência de contraventamentos ou ligações inadequadas. Todas as observações foram registradas detalhadamente, incluindo a localização, o tipo e a extensão dos danos, defeitos e deformações. As fotografias tiradas documentaram visualmente as condições da

estrutura, servindo como referência para as etapas seguintes da avaliação.

Após as inspeções visuais, foram realizados ensaios não destrutivos para avaliar a resistência da madeira nos elementos estruturais da cobertura. A técnica utilizada foi a resistografia, que consiste em medir a resistência da madeira à penetração de uma broca. O resistógrafo fornece um perfil da densidade e da integridade do material em profundidade, permitindo identificar áreas de degradação e defeitos internos sem danificar significativamente a estrutura. Os ensaios foram realizados em pontos selecionados com base nos resultados das inspeções visuais, priorizando áreas com sinais de danos ou suspeita de degradação. O resistógrafo foi posicionado perpendicularmente à superfície da madeira, e a broca foi inserida a uma velocidade constante. O equipamento registrou a resistência à penetração da broca em função da profundidade, gerando um resistograma, figura 7.

Figura 7 – Resistógrafo durante o ensaio de penetração



Fonte: Os autores

Os dados dos resistogramas foram analisados utilizando o Software IML-RESI, que permite identificar áreas com menor resistência, indicativas de podridão, galerias de insetos ou outros defeitos internos. A análise dos resistogramas forneceu informações valiosas sobre a integridade da madeira em profundidade, complementando os dados obtidos nas inspeções visuais. Para ter referência, do índice de penetração, foi feito ensaios na madeira nativa.

A terceira etapa da avaliação envolveu a criação de um modelo computacional da cobertura do teatro utilizando o Software

SAP2000. O objetivo da modelagem computacional era quantificar os esforços atuantes na estrutura e identificar as áreas mais críticas. O modelo geométrico da cobertura foi criado com base nas medições realizadas durante as inspeções visuais. As propriedades dos materiais, como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão da madeira, foram definidas com base em dados da literatura técnica e nos resultados dos ensaios não destrutivos. As condições de contorno do modelo foram definidas de forma a representar as ligações da cobertura com a estrutura de suporte do teatro. Os carregamentos atuantes na cobertura foram definidos de acordo com as normas técnicas brasileiras, incluindo o peso próprio dos elementos estruturais, a ação do vento e a sobrecarga de utilização. O modelo foi submetido a uma análise estrutural linear estática, utilizando o software SAP2000. A análise forneceu os esforços (forças e momentos) atuantes em cada elemento estrutural da cobertura. Os resultados da análise estrutural foram interpretados para identificar as áreas mais críticas da cobertura, ou seja, os elementos estruturais sujeitos aos maiores esforços.

Finalmente a abordagem integrada, que combina inspeções visuais, ensaios não destrutivos e modelagem computacional, é fundamental para obter um diagnóstico preciso e eficaz das estruturas de madeira históricas. Cada uma destas metodologias fornece informações complementares sobre o estado da estrutura, permitindo uma avaliação mais completa e detalhada. Ao combinar estas três metodologias, é possível obter um diagnóstico mais preciso e completo, que serve de base para a definição de um plano de reabilitação adequado. A abordagem integrada permite identificar as causas da degradação, avaliar a magnitude dos danos, quantificar os esforços atuantes e simular o impacto de diferentes intervenções. Desta forma, é possível tomar decisões informadas e otimizar as estratégias de reabilitação, garantindo a segurança, a durabilidade e a conservação das estruturas de madeira históricas.

No caso do Teatro Francisco Nunes, a abordagem integrada permitiu obter um diagnóstico detalhado da estrutura da cobertura, identificando as patologias presentes, avaliando a resistência da madeira e quantificando os esforços atuantes. Este diagnóstico serviu de base para a definição de um plano de reabilitação que visa garantir a segurança, a durabilidade e a conservação deste importante marco arquitetônico.

3. Resultados e discussões.

Esta seção apresenta os resultados detalhados da avaliação diagnóstica da cobertura em madeira do Teatro Francisco Nunes, seguida por uma análise crítica das implicações destes resultados para a reabilitação estrutural. Esta investigação integrou inspeções visuais, ensaios não destrutivos (resistogramas) e modelagem computacional, visando estabelecer uma base sólida para decisões fundamentadas sobre a restauração e preservação deste importante patrimônio cultural.

3.1 Inspeções visuais

As inspeções visuais constituíram a etapa inicial do processo avaliativo, permitindo uma análise abrangente das condições gerais da estrutura. Identificamos os seguintes problemas principais:

Danos bióticos: Detectou-se evidências de ataques por fungos e cupins em diversos elementos estruturais, particularmente nas áreas com maior umidade e ventilação deficiente. A identificação visual incluiu manchas características, alterações na coloração da madeira e presença de galerias típicas de insetos xilófagos, figura 8.

Figura 8 – Ataque de fungos em uma viga da cobertura, evidenciando a necessidade de tratamento imediato.



Fonte: Os autores

Danos abióticos: Identificou-se múltiplos defeitos construtivos, incluindo contraventamentos desalinhados, ausência de ligações adequadas em determinados pontos e emendas mal executadas nas terças figura 9.

Figura 9 – Contraventamentos desalinhados ou ausentes, elementos soltos e ausência de mãos francesas.



Fonte: Os autores

Observou-se também empenamentos e arqueamentos em terças e mãos-francesas, sugerindo possível comprometimento da capacidade de suporte de carga em alguns elementos. A fixação inadequada dos arcos aos apoios de concreto emergiu como uma preocupação significativa. O número insuficiente de parafusos, associado a sinais visíveis de corrosão, indica um risco potencial para a estabilidade estrutural, especialmente sob ação de cargas variáveis como ventos figura 10.

Figura 10 – Número insuficiente de parafusos de 12,7 mm para fixação dos arcos.



Fonte: Os autores

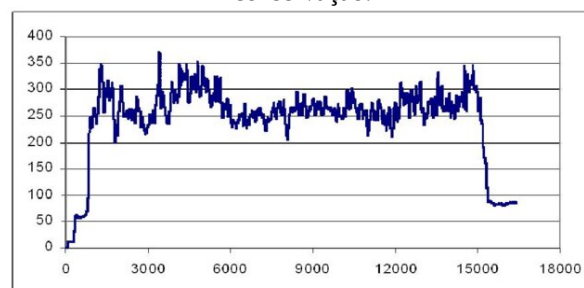
3.2 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios realizados com o resistógrafo IML-RESI F400 forneceram dados valiosos sobre a resistência interna da madeira. Destacam-se os seguintes resultados:

Heterogeneidade na resistência: A análise dos resistogramas, figura 11, revelou significativa variação na resistência das lâminas que compõem os arcos. Alguns trechos apresentaram comportamento comparável ao da madeira de referência, enquanto outros demonstraram resistência consideravelmente inferior.

Áreas de degradação: Identificou-se zonas com menor resistência à penetração da broca, indicando presença de podridão, galerias de insetos ou outros defeitos internos. Estas áreas foram mapeadas para orientar futuras intervenções de reforço ou substituição.

Figura 11 – Exemplo de resistograma de áreas com boa conservação.



Fonte: Os autores

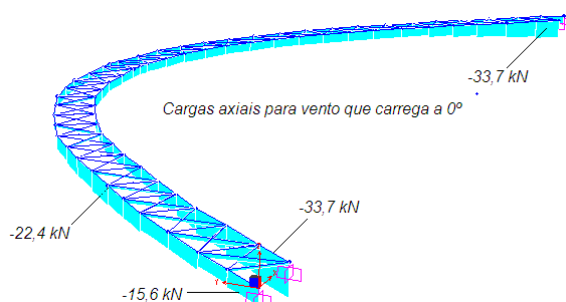
3.3 Modelagem Computacional

A modelagem realizada com o software SAP2000 permitiu quantificar os esforços atuantes e identificar as áreas críticas da estrutura. Os principais resultados foram:

Concentração de esforços: A análise revelou concentração significativa de tensões em determinados elementos estruturais, notadamente nos arcos próximos aos apoios, devido à ação do vento e às cargas permanentes. Esta concentração sugere a necessidade de reforços localizados para garantir a segurança estrutural, figura 12.

Compressão máxima nas terças: A estimativa das forças de compressão máximas de cálculo atuando em cada terça, influenciados pelo contraventamento dos arcos, atingiu valores expressivos nos extremos do galpão. Este achado indica a necessidade de avaliar cuidadosamente a capacidade de suporte destes elementos e, se necessário, implementar reforços.

Figura 12 – Modelo computacional da cobertura mostrando a distribuição de forças axiais máximas.



Fonte: Os autores

A tabela 1 sintetiza os esforços solicitantes críticos nos principais elementos estruturais, obtidos através da modelagem computacional.

Tabela 1 – Esforços solicitantes críticos nos elementos principais

Elemento Estrutural	Axial (kN)	M. Fletor (kNm)	Cortante (kN)
Arco Superior	-22,4	0,17	0,37
Arco Inferior	-33,7	0,4	0,88
Montante	-2,2	0	0
Diagonal	4,1	0	0

Fonte: Autores

3.4 Discussões

Os resultados desta avaliação diagnóstica revelam um estado de conservação que demanda atenção imediata e intervenção criteriosa. A combinação de danos biológicos, defeitos construtivos e concentrações de esforços indica vulnerabilidade estrutural, exigindo um plano de reabilitação abrangente para garantir segurança e longevidade.

A presença de danos bióticos constitui um problema recorrente em estruturas históricas de madeira. Condições de umidade elevada e ventilação insuficiente criam ambiente propício para o desenvolvimento de organismos degradadores, que comprometem progressivamente a resistência do material. A heterogeneidade observada nos ensaios não destrutivos pode ser atribuída tanto à variabilidade natural da madeira quanto à ação diferenciada de agentes degradadores ao longo do tempo. A identificação precisa das áreas afetadas e a aplicação de tratamentos específicos são essenciais para conter a progressão destes danos.

Os defeitos construtivos identificados podem resultar de erros de projeto ou execução, bem como de deformações acumuladas ao longo das décadas. A fixação inadequada dos arcos aos apoios de concreto, com parafusos insuficientes e sinais de corrosão, representa risco significativo para a estabilidade global, particularmente sob ação de cargas dinâmicas como ventos. A correção destes defeitos é fundamental para assegurar distribuição adequada dos esforços e integridade estrutural.

Nossa modelagem computacional evidenciou concentração de esforços em elementos específicos, como os arcos próximos aos apoios. Este achado indica a necessidade de reforços localizados para aumentar a capacidade resistente nestas áreas críticas. As forças de compressão estimadas nas terças sugerem a necessidade de avaliação detalhada da capacidade de suporte destes elementos, com possível necessidade de reforço ou substituição.

É importante reconhecer algumas limitações metodológicas em esta avaliação. A técnica de resistografia, embora valiosa para identificar áreas de degradação interna, não fornece informações precisas sobre a natureza e extensão completa dos danos. A análise visual, ainda que abrangente, pode não ter detectado todos os defeitos ocultos. Adicionalmente, nossa modelagem computacional baseou-se em análise linear estática, que não contempla efeitos de não linearidades geométricas e do comportamento ortotrópico característico da madeira.

Os resultados obtidos fornecem, contudo, informações essenciais para a definição de um plano de reabilitação adequado. Recomenda-se que este plano inclua: tratamento dos danos biológicos com aplicação de preservativos e melhoria das condições de ventilação; correção dos defeitos construtivos, incluindo realinhamento de elementos, instalação de ligações adequadas e substituição de emendas comprometidas; reforço dos elementos estruturais críticos, particularmente arcos próximos aos apoios e terças submetidas a compressão significativa; e substituição seletiva de elementos estruturais severamente danificados, utilizando madeira de qualidade compatível e técnicas construtivas apropriadas.

Para complementar esta avaliação, sugere-se pesquisas futuras que incluam: análise detalhada da madeira, com identificação precisa das espécies e avaliação de propriedades mecânicas; inspeção aprofundada das ligações, avaliando corrosão e capacidade de suporte; modelagem computacional não linear, considerando efeitos de não linearidades geométricas e comportamento ortotrópico da madeira; monitoramento contínuo da estrutura através de sensores para medição de deformações e esforços; e análise de risco para avaliar a probabilidade de falha estrutural sob diferentes condições de carregamento.

4. Conclusões

A avaliação diagnóstica da cobertura em madeira do Teatro Francisco Nunes revelou condições que demandam intervenções criteriosas e metodicamente planejadas. Identificou-se uma combinação preocupante de danos bióticos, abióticos e concentrações de esforços que, em conjunto, comprometem a integridade estrutural deste importante exemplar arquitetônico.

Estes achados, diretamente alinhados com o objetivo principal de compreender e documentar o estado atual da cobertura, estabelecem fundamentos consistentes para a elaboração de um plano de reabilitação abrangente. A investigação integrada que se conduziu – combinando inspeções visuais, ensaios não destrutivos e modelagem computacional – permitiu uma visão multidimensional dos problemas existentes, superando as limitações inerentes a abordagens isoladas.

As implicações práticas deste estudo são significativas e apontam para a necessidade urgente de implementação de medidas corretivas em três frentes principais: tratamento dos danos biológicos, correção dos defeitos construtivos e reforço dos elementos estruturais críticos. Estas intervenções são essenciais não apenas para garantir a segurança imediata da estrutura, mas também para assegurar sua durabilidade e preservação como patrimônio cultural.

Recomenda-se, como desdobramentos naturais desta pesquisa, a realização de análises mais detalhadas dos materiais constituintes, incluindo caracterização completa das espécies de madeira e suas propriedades mecânicas atuais. Sugerire-se também o desenvolvimento de modelos computacionais mais sofisticados, que incorporem comportamentos não lineares e características ortotrópicas da madeira, além da implementação de um sistema de monitoramento contínuo que permita acompanhar o desempenho estrutural ao longo do tempo.

Vale ressaltar que a preservação deste legado arquitetônico transcende aspectos puramente técnicos. Representa um

compromisso fundamental com a memória coletiva e a identidade cultural da comunidade belo-horizontina. O Teatro Francisco Nunes, além de sua função como espaço cultural, constitui um testemunho tangível de técnicas construtivas e soluções estruturais que merecem ser estudadas, documentadas e preservadas para as gerações futuras.

A abordagem metodológica que se desenvolveu neste estudo pode, ademais, servir como referência para avaliações diagnósticas de outras estruturas históricas em madeira, contribuindo para a preservação mais ampla do patrimônio edificado e para o desenvolvimento de práticas de conservação mais eficazes e sustentáveis.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro nesta pesquisa.

6. Referências

- [1] PINHEIRO, A. V. S., SALOMÃO, P. E. A. *Patrimônio histórico – a importância da conservação de edifícios históricos para a preservação da identidade cultural*. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 1, p.1-11, 2021. https://revistas.unipacto.com.br/storage/publicacoes/2021/617_patrimonio_historico_a_importancia_da_conservacao_de_edificios_histori.pdf
- [2] THRAVALOU, S., PHILOKYPROU, M. *Urban design considerations in the environmental assessment of vernacular buildings with timber projections (sachnisi): The case of Nicosia's historic center*. Frontiers of Architectural Research, v. 10, n. 1, p.176-189, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.001>
- [3] SERRES-LAFONTAINE, C., BLANCHET, P., CHARRON, S., DELEM, L., WASTIELS, L. *Bio-based innovations in cross-laminated timber (CLT) envelopes: A hygrothermal and life cycle analysis (LCA) study*. Building and Environment, v. 256, 111499, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111499>.
- [4] ALI, B. S., CASTRO, J. J., Shogo Omi 2 and Karishma Nazimi 1 *Preserving the Past: Investigating Zanzibar's Ancient Construction Materials for Sustainable Heritage Conservation*. Buildings, v. 14, 2129, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14072129>
- [5] SCAZZOSI, L. *Reading and assessing the landscape as cultural and historical heritage*. Landscape Research, v. 29, n. 4, p.335–355, 2004. <https://doi.org/10.1080/0142639042000288993>
- [6] NAÇÕES UNIDAS. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015.
- [7] XIAO, Q. *Explore the Design Principles and Prospects of Green Buildings*. Highlights in Science, Engineering and Technology, ACEGE2023, v. 75, p.251-256, 2023
- [8] BELLO-BRAVO, J., LUTOMIA, A. N. *Sustainable development or developmental sustainability: Two cases of indigenous knowledge and practices for sustainable sourcing for wood-based design-solutions*. Trees, Forests and People, v. 8, 100253, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100253>
- [9] BRAVO-ARREPOL, G. et al. *Isolated lignans of araucaria araucana (molina) k. koch provide wood protection against attack by the xylophagous fungus pleurotus ostreatus (jacq.) p. kumm.* J. Chil. Chem. Soc. [online], v. 68, n. 2, p.5871-5875, 2023. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-97072023000205871>
- [10] CARRASCO, E. V. M., FIGUEREDO, C. A. S., BREMER, C. F., MANTILLA,

- J. N. R. *Thermography in the identification of pathologies in ancient building wood*. Concilium (English Language edition). v.24, n. 13, p.367-381, 2024. <http://dx.doi.org/10.53660/CLM-3694-24N28>
- [11] GOES, M. B., CARRASCO, E. V. M., GUIMARAES, A. B. Use of acoustic tomograph for detecting internal faults in wooden parts. *Mix Sustentável*, v. 9, p.155-163, 2023. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n5.155-163>
- [12] CARRASCO, E. V. M., MANTILLA, J. N. R. *Analysis of the Structural Integrity of Wooden Structures in Service: Case Study with Diagnostic Methodologies and Rehabilitation Strategie*. Concilium (English Language edition), v. 24, n. 17, p.467-481, 2024. <http://dx.doi.org/10.53660/CLM-4039-24R38>
- [13] XIN, Z., KE, D., ZHANG, H., YU, Y., LIU, F. *Non-destructive evaluating the density and mechanical properties of ancient timber members based on machine learning approach*. *Construct. Build. Mater.*, v. 375 e130976, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127855>
- [14] LOPES, M. A. C. *Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de Madeira em coberturas de edifícios antigos*. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Porto, Portugal, 2007; 203 p.
- [15] AVETA, A. *Consolidamento e restauro delle strutture in legno*. Palermo, Italia: Tipografia Priulla; 2013: 44 p. ebook.
- [16] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento*, Rio de Janeiro, 2022.
- [17] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço*, Rio de Janeiro, 2024.