

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

EZEQUIEL MENEGAZ MENEGHETTI

**ANÁLISES TERMOMECÂNICAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE
VIGAS DE MADEIRA DE *PINUS* sp. REFORÇADAS COM BARRAS DE AÇO
Influência do reforço no aumento do tempo de exposição ao fogo**

Ilha Solteira - SP
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EZEQUIEL MENEGAZ MENEGHETTI

**ANÁLISES TERMOMECAÑICAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE
VIGAS DE MADEIRA DE *PINUS sp.* REFORÇADAS COM BARRAS DE AÇO
Influência do reforço no aumento do tempo de exposição ao fogo**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Sistemas Estruturais Construtivos

Prof. Dr. André Luis Christoforo
Orientador

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Meneghetti, Ezequiel Menegaz.

M541a Análises termomecânicas via método dos elementos finitos de vigas de madeira de Pinus sp. reforçadas com barras de aço: influência do reforço no aumento do tempo de exposição ao fogo / Ezequiel Menegaz Meneghetti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026

304 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas estruturais construtivos, 2026

Orientador: André Luis Christoforo

Inclui bibliografia

1. Desempenho termomecânico. 2. Resistência ao fogo. 3. Madeira reforçada com aço. 4. Simulação termomecânica acoplada. 5. Vigas de madeira Pinus.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta significativo potencial de impacto em âmbito global ao ampliar o entendimento sobre o comportamento ao fogo de estruturas híbridas madeira-aço, tema diretamente relacionado aos atuais desafios de sustentabilidade, segurança estrutural e uso eficiente de recursos naturais. A partir de modelagem numérica consistente, demonstra-se que a incorporação de reforço metálico embutido é capaz de aumentar de forma relevante o tempo de resistência ao fogo de vigas de madeira, oferecendo subsídios técnicos aplicáveis a distintos contextos normativos e construtivos, em especial àqueles voltados à redução da pegada de carbono na construção civil. Os resultados obtidos reforçam a viabilidade do emprego da madeira como material estrutural em edificações de médio e grande porte, estimulam o desenvolvimento de soluções híbridas mais seguras e resilientes e contribuem para a convergência entre inovação tecnológica, segurança contra incêndio e objetivos globais de sustentabilidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research presents significant potential for global impact by expanding the understanding of the fire behavior of hybrid timber–steel structures, a topic directly related to current challenges in sustainability, structural safety, and the efficient use of natural resources. Through consistent numerical modeling, it is demonstrated that the incorporation of embedded steel reinforcement can substantially increase the fire resistance time of timber beams, providing technical support applicable to different regulatory and constructive contexts, particularly those aimed at reducing the carbon footprint of the construction sector. The results reinforce the feasibility of using timber as a structural material in medium- and large-scale buildings, encourage the development of safer and more resilient hybrid solutions, and contribute to the convergence of technological innovation, fire safety, and global sustainability objectives.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISES TERMOMECÂNICAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS DE MADEIRA DE PINUS sp. REFORÇADAS COM BARRAS DE AÇO - Influência do reforço no aumento do tempo de exposição ao fogo

AUTOR: EZEQUIEL MENEGAZ MENEGHETTI

ORIENTADOR: ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**
Data: 22/04/2026 16:16:26-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Documento assinado digitalmente
 **VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO**
Data: 22/04/2026 16:18:52-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Itapeva - ICE

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**
Data: 22/04/2026 16:21:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Rondônia - UNIR

Ilha Solteira, 22 de abril de 2026.

“Eu sou o caminho, a verdade e a vida. Ninguém vem ao Pai, a não ser por mim.

Se vocês realmente me conhecessem, conheceriam também o meu Pai.

Já agora vocês o conhecem e o tem visto.”

Jesus Cristo de Nazaré (João 14:6)

“Para os crentes, Deus está no princípio das coisas. Para os cientistas, no final de cada reflexão.”

Max Planck

“A ciência sem a religião é manca. A religião sem a ciência é cega”

Albert Einstein

“Acredito firmemente que a Bíblia é a palavra de Deus, escrita por pessoas inspiradas. Eu a estudo todos os dias.”

Isaac Newton

“A matemática é o alfabeto com qual, Deus escreveu o universo.”

Galileu Galilei

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito, nos aproxima.”

Louis Pasteur

“Os céus proclamam a glória de Deus, e o firmamento anuncia a obra das suas mãos”

Salmos 19:1

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de cumprir o propósito que Ele estabeleceu para minha existência. A Ele rendo graças pela capacitação diária, pela sabedoria e amadurecimento construídos ao longo deste caminho e pelo discernimento concedido em cada decisão. Sou profundamente grato, Pai celestial, por Sua presença real e constante, direção e fidelidade em minha vida.

Adiante, merece menção importante e reconhecimento uma pessoa fundamental para mim e para minha trajetória. Em especial, minha amada esposa, Flaviani Fagundes Meneghetti, pelo amor incondicional, pelo apoio devotado e pela dedicação admirável como mãe, mulher e profissional que és. Inexistem palavras no dicionário capazes de expressar e traduzir a dimensão da sua importância em minha vida. Você é alicerce, inspiração e força em todos os momentos da minha vida. Obrigado por todos os momentos de ontem, hoje e sempre meu Amor, amo-a com todas as forças do meu coração.

Também aos meus filhos, Marco Victório Menegaz Meneghetti e Giovanna Antonella Menegaz Meneghetti, razão diária do nosso sorriso e do nosso desenvolvimento como seres humanos. Vocês chegaram para iluminar nossa família, ensinando-nos o verdadeiro sentido do amor, da responsabilidade e da gratidão. A presença de vocês é uma dádiva pela qual agradecemos incessantemente, um verdadeiro presente de Deus.

Aos meus pais Gilmar Meneghetti e Marlei Marta Menegaz Meneghetti meu eterno agradecimento. Vocês foram e sempre serão a base de tudo o que sou. Obrigado pelo amor incondicional, pelos ensinamentos transmitidos com exemplo, pelos valores cultivados ao longo da vida e pelo apoio constante em cada etapa da minha caminhada. Cada conquista minha carrega muito do esforço, dedicação e do cuidado de vocês. Sou imensamente grato a Deus por ser filho de vocês.

À minha irmã Luana Aparecida Menegaz Meneghetti, Doutora em Agricultura Tropical, pelo apoio quando necessário, valiosas orientações, pela disponibilidade e pelo tempo dedicado ao longo dessa jornada. Você foi uma das minhas inspirações para retornar a academia e buscar essa necessária e enriquecedora reciclagem intelectual. Grato pelo seu exemplo.

Ao meu irmão Gianfrancesco Menegaz Meneghetti, mesmo pelo apoio silencioso e distante. Que a convivência em um ambiente familiar marcado pela busca constante de conhecimento e formação lhe sirva também como estímulo, à sua maneira e ao seu tempo.

Ao amigo, mestre, mentor intelectual e orientador deste trabalho, André Luís Christoforo, expresso minha profunda gratidão pelo conhecimento compartilhado, pelos

ensinamentos valiosos e pela dedicação constante para comigo. Agradeço a oportunidade, confiança depositada em mim e neste projeto. Sua postura acadêmica, rigor científico e compromisso com a excelência tornaram-se uma inspiração permanente em minha trajetória profissional e intelectual.

Não posso deixar de registrar meu agradecimento aos profissionais que contribuíram de forma direta ao longo deste mestrado, pelo conhecimento compartilhado e pelas valiosas contribuições acadêmicas. São eles: Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo, Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki, Prof^ª. Dr^a Lisiane Pereira Prado, Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim e Prof. Dr. Vinícius Borges de Moura Aquino.

Agradeço ao amigo Tiago Montanha Padilha pela valiosa contribuição com seus conhecimentos, bem como pelas inúmeras horas dedicadas ao auxílio no esclarecimento e compreensão de questões inerentes ao tema deste trabalho. Sua disponibilidade e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Também devo registrar um agradecimento à Guilherme dos Santos Silva pela generosa contribuição no que concerne ao método de regressão simbólica, pelas horas dedicadas em apoio a este trabalho, cujo conhecimento, discussões e esclarecimentos foram relevantes para o aprimoramento deste estudo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), ao Departamento de Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, meu sincero agradecimento pela infraestrutura, pelo suporte institucional e pelas condições oferecidas.

Por conseguinte, registro meu agradecimento àqueles que estiveram presentes ainda durante a graduação e que, mesmo após tantos anos, contribuíram de maneira significativa para que eu pudesse ingressar no mestrado. Aos amigos Prof. Dr. André Luiz Nonato Ferraz e Prof. Dr. Maicon José Hillesheim, gratidão pelo apoio oferecido. Ao Prof. Dr. Ferraz, agradeço a amizade e parceria ao longo da graduação, cujos ensinamentos hoje se refletem em conhecimentos sólidos e duradouros. Ao Prof. Dr. Maicon, cuja trajetória inspira todos que a conhecem, deixo meu reconhecimento por sua dedicação, luz e mérito em cada conquista alcançada. Agradeço, ainda, pela amizade preservada ao longo do tempo, mesmo à distância.

Finalmente, agradeço à equipe da biblioteca da FEIS (UNESP), nas pessoas de Sandra Montibeller e Marília Gabriela Pereira, que, de forma gentil e solícita, ajudaram-me na normalização deste trabalho, com o qual chego ao final deste mestrado com a sensação de dever cumprido.

A todos meu mais sincero agradecimento!

RESUMO

A crescente demanda por soluções construtivas sustentáveis tem impulsionado o uso de materiais renováveis na construção civil, entre os quais a madeira destaca-se por suas qualidades estruturais, baixo impacto ambiental e excelente desempenho térmico. No Brasil seu uso estrutural obteve avanços, embora persistam desafios que limitam sua adoção em larga escala, em contraste com países de tradição consolidada em sua utilização. O advento da madeira engenheirada possibilitou seu emprego em estruturas intrincadas submetidas a diferentes tipos de carregamentos. No que concerne à complexidade, a madeira é um material anisotrópico com comportamento ortotrópico, impondo reptos adicionais para sua análise estrutural. Em situações de incêndio, a madeira sofre degradação progressiva por carbonização, o que afeta diretamente sua resistência mecânica. Nesse tocante, a NBR 7190:2022 não dedica uma seção para abordagem sobre esse assunto, evidenciando uma lacuna normativa. Todavia, ao contrário de materiais como o aço, a madeira possui uma taxa de perda de desempenho mais lenta, o que pode resultar em tempos significativos de resistência ao fogo, desde que suas propriedades sejam corretamente consideradas em projeto. Nesse contexto, o reforço de elementos estruturais de madeira com barras de aço ou compósitos vem sendo investigado como alternativa para aumentar a resistência mecânica, controlar deformações e ampliar o tempo de colapso sob exposição ao fogo. Conforme delineado na literatura, reforços podem atuar de forma sinérgica com o comportamento da madeira, especialmente quando embutido na zona tracionada da seção transversal. Entretanto, a interação entre materiais distintos, com diferentes coeficientes de dilatação térmica, e o comportamento da interface adesiva sob temperatura elevada ainda carecem de estudos mais aprofundados. Realizou-se neste trabalho um levantamento robusto da literatura acadêmica e de bases de dados de propriedades intelectuais, reproduziu-se computacionalmente ensaios experimentais extraídos da literatura, validou-se modelos numéricos em temperatura ambiente e em altas temperaturas e alvitrou-se uma abordagem termomecânica acoplada para o estudo paramétrico. A posteriori, investigou-se o comportamento termomecânico de vigas de madeira reforçadas com barras de aço, por meio de um estudo paramétrico sólido com 168 configurações distintas (variações geométricas, posição dos reforços, diâmetro das barras) submetidas ao processamento numérico, e, adicionalmente, se propôs, via regressão simbólica, uma expressão matemática altamente interpretável, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9845$ para determinação do tempo de ruptura de vigas de madeira de *Pinus sp.*, reforçadas ou não, em condição de incêndio. O resultado do levantamento da literatura identificou uma inópia crítica de trabalhos com proposta de análise do comportamento da madeira reforçada em situações de incêndio, sobretudo em escala real. Em relação aos resultados termomecânicos, esses sugerem uma tendência monotônica no aumento do tempo de resistência ao fogo de vigas reforçadas com barras de aço com menor inércia de até 122,90% e uma tendência não-linear clara para vigas de maior inércia, onde os ganhos estão mais concentrados na esfera mecânica. Observou-se que a taxa de redução gradual da rigidez tem forte dependência do vão da viga durante o processo de degradação térmica. Vigas de menor seção apresentaram maior sensibilidade a degradação térmica, enquanto vigas de maior seção exibiram ganhos relativamente modestos no tempo de resistência ao fogo. Não obstante, o aumento do diâmetro das barras favorece a distribuição das tensões da seção remanescente e que a alocação na zona mais tracionada resulta em um melhor desempenho. Conclui-se que o reforço metálico constitui uma solução eficaz e viável, fornecendo subsídios sólidos para o dimensionamento seguro de estruturas de madeira em situação de incêndio.

Palavras-chave: desempenho termomecânico; resistência ao fogo; madeira reforçada com aço; simulação termomecânica acoplada; vigas de madeira *Pinus*.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable construction solutions has driven the use of renewable materials in civil engineering, among which timber stands out due to its structural qualities, low environmental impact, and excellent thermal performance. In Brazil, its structural use has advanced, although challenges persist that limit its large-scale adoption, in contrast to countries with a well-established tradition in timber construction. The advent of engineered wood has enabled its application in complex structures subjected to different types of loading. Regarding its complexity, timber is an anisotropic material with orthotropic behavior, imposing additional challenges for structural analysis. Under fire conditions, timber undergoes progressive degradation through charring, which directly affects its mechanical strength. In this regard, ABNT NBR 7190:2022 does not dedicate a specific section to this subject, highlighting a normative gap. However, unlike materials such as steel, timber exhibits a slower rate of performance degradation, which may result in significant fire resistance times, provided that its properties are properly considered in design. In this context, the reinforcement of timber structural elements with steel bars or composites has been investigated as an alternative to enhance mechanical resistance, control deformations, and extend the time to collapse under fire exposure. As outlined in the literature, reinforcements may act synergistically with timber behavior, especially when embedded in the tension zone of the cross-section. Nevertheless, the interaction between distinct materials with different thermal expansion coefficients, as well as the behavior of the adhesive interface under elevated temperatures, still require further investigation. This study proposed a comprehensive survey of academic literature and intellectual property databases, the computational reproduction of experimental tests reported in the literature, the validation of numerical models at ambient and elevated temperatures, and the proposal of a coupled thermomechanical approach for parametric analysis. Subsequently, the thermomechanical behavior of timber beams reinforced with steel bars was investigated through a robust parametric study comprising 168 distinct configurations (geometric variations, reinforcement position, and bar diameter) processed numerically. Additionally, a highly interpretable mathematical expression was proposed via symbolic regression, with a coefficient of determination $R^2 = 0.9845$, to estimate the failure time of *Pinus* sp. timber beams, reinforced or not, under fire conditions. The literature survey revealed a critical scarcity of studies addressing the behavior of reinforced timber under fire, particularly at full scale. Regarding the thermomechanical results, a monotonic trend was observed in the increase of fire resistance time for beams with lower inertia, reaching gains of up to 122.90%, whereas a clear non-linear trend was identified for beams with higher inertia, where improvements are more concentrated in the mechanical domain. It was also observed that the gradual reduction in stiffness is strongly dependent on the beam span during thermal degradation. Beams with smaller cross-sections showed higher sensitivity to thermal degradation, while larger sections exhibited relatively modest gains in fire resistance time. Furthermore, increasing the bar diameter enhances stress redistribution in the residual cross-section, and placing the reinforcement in the most tensioned zone leads to improved performance. It is concluded that steel reinforcement constitutes an effective and viable solution, providing solid support for the safe design of timber structures under fire conditions.

Keywords: thermomechanical performance; fire resistance; steel-reinforced timber; coupled thermomechanical simulation; *Pinus* timber beams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Centro de Convenções Ulisses Guimarães.	42
Figura 2 - Primeiro edifício multipavimentos do Brasil.....	42
Figura 3 - Áreas de conservação do setor de árvores cultivadas.	43
Figura 4 - Distribuição de área plantada no Brasil por gênero.....	44
Figura 5 - Distribuição de florestas plantadas no Brasil [hectares].....	46
Figura 6 - Distribuição de área plantada de <i>Pinus</i> nas regiões Sul e Sudeste brasileira [hectares].	47
Figura 7 - Domínios fitogeográficos das florestas nativas brasileiras.....	48
Figura 8 - Obra em madeira lamelada colada (MLC) Metropol Parasol.....	51
Figura 9 - Edifício Mjøstårnet construído com madeira engenheirada.	51
Figura 10 - Centre Pompidou-Metz localizado na França.....	52
Figura 11 - Ampliação do aeroporto de Oslo.	53
Figura 12 - Estrutura anatômica do <i>Pinus elliottii</i>	54
Figura 13 - Massa específica da madeira <i>Pinus taeda</i> em função da idade.	58
Figura 14 - Resistência a flexão do <i>Pinus taeda</i> em função da idade 60	
Figura 15 - Resistência média ao cisalhamento em relação ao ângulo de colagem.	61
Figura 16 - Propriedades do <i>Pinus taeda</i> com idades entre 20 e 100 anos.	63
Figura 17 - Coeficientes de retratibilidade tangencial, radial e longitudinal a 12% dos lenhos juvenil e adulto de <i>Pinus elliottii</i>	68
Figura 18 - Dureza das espécies de <i>Pinus</i>	78
Figura 19 - Zonas de degradação inerentes a seção da madeira.	82
Figura 20 - Camada de carbonização e seção transversal remanescente pós-incêndio.	83
Figura 21 - Curva de incêndio-padrão ASTM E-119-1.....	83
Figura 22 - Curva incêndio-padrão ISO 834 86	
Figura 23 - Taxa de carbonização do <i>Pinus</i> sob diferentes condições.	88
Figura 24 - Número de depósitos de patentes.	100
Figura 25 - Protocolo PRISMA e etapas de identificação e filtragem de estudos científicos: abordagem sobre a temática do estudo proposto.	107
Figura 26 - Volumetria de publicações: Levantamento de artigos indexados.....	110
Figura 27 - Volumetria de publicações: Levantamento de depósitos de patentes.....	110
Figura 28 - Volumetria de publicações por autor dos artigos da composição basilar da proposta temática.....	111

Figura 29 - Principais inventores por base de patentes.	112
Figura 30 - Volumetria de publicações por área do conhecimento.	113
Figura 31 - Distribuição geográfica dos artigos indexados.	114
Figura 32 - Distribuição geográfica das patentes depositadas.	114
Figura 33 - Coocorrência de palavras-chave dos artigos eu compõe o corpo basilar.	116
Figura 34 - Configuração de ensaio de flexão a quatro pontos.	123
Figura 35 - Disposição dos termopares e indicativo das seções.	125
Figura 36 - Seções com posicionamento dos termopares.	126
Figura 37 - Variação da temperatura na madeira em função da profundidade (ensaio de queima por 60 minutos).	127
Figura 38 - Corpo de prova antes do teste de carga.	127
Figura 39 - Resultados do teste de carga em queima: (a) força x deformação; (b) momento x curvatura.	129
Figura 40 - Evolução do coeficiente de fluência por cisalhamento.	130
Figura 41 - Resistência a flexão e módulo de elasticidade com a evolução da temperatura.	131
Figura 42 - Capacidades de carga de vigas de madeira, aço e concreto.	132
Figura 43 - Teste experimental a 4 pontos.	133
Figura 44 - Teste de flexão.	135
Figura 45 - Vigas com defeitos após o teste de flexão.	139
Figura 46 - Corpos de prova de madeira preparadas para os testes.	141
Figura 47 - Modelos constitutivos: (a) reforço do aço; (b) madeira.	149
Figura 48 Dados experimentais e comparação dos envelopes de ruptura para o <i>Pinus elliottii</i> (esquerda) e <i>Goupia glabra</i> (direita).	153
Figura 49 - Arranjo dos reforços utilizados nos corpos de prova.	157
Figura 50 - Rompimento na falha da madeira (nó).	158
Figura 51 - Arranjo do teste de flexão das vigas de madeira lamelada colada.	162
Figura 52 - Comparativo entre o ensaio experimental e o modelo numérico.	170
Figura 53 - Corpos de prova submetidos ao teste de fogo: (a) seção cilíndrica; (b) seção retangular.	172
Figura 54 - Comparativo entre ensaios experimentais e numéricos: (a) corpos de prova retangulares pós-incêndio; (b) corpos de prova cilíndricos pós-incêndio; (c) resultados das simulações numéricas para os corpos de prova retangulares e cilíndricos.	173
Figura 55 - Disposição do reforço longitudinal.	184
Figura 56 - Modelo de flexão a 4 pontos.	186

Figura 57 - Características viga RGlulam2-2	190
Figura 58 - Comparação de resultados do modelo experimental e numérico em <i>l</i> 200.....	192
Figura 59 - Ampliação da região de interesse de dados.	192
Figura 60 - Viga virtual processada pelo método de controle de carga.	193
Figura 61 - Comparação dos resultados experimental e numérico no último ponto de convergência (ruptura).....	194
Figura 62 - Viga virtual processada pelo método de deslocamento prescrito.	194
Figura 63 - Falha viga RGlulam2-2.....	195
Figura 64 - Distribuição das tensões longitudinais no modelo numérico da viga.....	195
Figura 65 - Detalhe da região de maior concentração de tensões no modelo numérico.	196
Figura 66 - Seção transversal do modelo térmico físico.	198
Figura 67 - Esquema de distribuição de forças.....	199
Figura 68 - Ábaco de condutividade térmica.....	201
Figura 69 - Ábaco de relação entre calor específico e temperatura para madeira.....	202
Figura 70 - Ábaco de relação entre taxa de densidade e temperatura para madeira.....	204
Figura 71- Comparativo do resultado entre o modelo experimental e o modelo numérico em altas temperaturas.	211
Figura 72 - Campo de tensões normais longitudinais atuantes.	220
Figura 73 - Degradação térmica da viga virtual.	222
Figura 74 - Conceitos: A - Modificação; B - Otimização de constantes; C - Recombinação.....	223
Figura 75 - Resultados gráficos das vigas 100x150x3000mm.....	228
Figura 76 - Resultados gráficos das vigas 100x150x4000mm.....	230
Figura 77 - Resultados gráficos das vigas 100x150x5000mm.....	233
Figura 78 - Resultados gráficos das vigas 100x200x3000mm.....	235
Figura 79 - Resultados gráficos das vigas 100x200x4000mm.....	237
Figura 80 - Resultados gráficos das vigas 100x200x5000mm.....	239
Figura 81 - Resultados gráficos das vigas 100x250x3000mm.....	241
Figura 82 - Resultados gráficos das vigas 100x250x4000mm.....	243
Figura 83 - Resultados gráficos das vigas 100x250x5000mm.....	246
Figura 84 - Resultados gráficos das vigas 100x300x3000mm.....	248
Figura 85 - Resultados gráficos das vigas 100x300x4000mm.....	250
Figura 86 - Resultados gráficos das vigas 100x300x5000mm.....	252
Figura 87 - Resultados gráficos das vigas 200x300x3000mm.....	254
Figura 88 - Resultados gráficos das vigas 200x300x4000mm.....	256

Figura 89 - Resultados gráficos das vigas 200x300x5000mm.	258
Figura 90 - Resultados gráficos das vigas 200x400x3000mm.	260
Figura 91 - Resultados gráficos das vigas 200x400x4000mm.	262
Figura 92 - Resultados gráficos das vigas 200x400x5000mm.	264
Figura 93 - Resultados gráficos das vigas 200x400x5000mm.	266
Figura 94 - Resultados gráficos das vigas 200x400x5000mm.	268
Figura 95 - Resultados gráficos das vigas 200x500x5000mm.	270
Figura 96 - Resultados gráficos das vigas 200x600x3000mm.	272
Figura 97 - Resultados gráficos das vigas 200x600x4000mm.	274
Figura 98 - Resultados gráficos das vigas 200x600x5000mm.	276
Figura 99 - Matriz de dispersão e distribuições de frequência.	281
Figura 100 - Complexidade <i>versus</i> métricas de erro.	282
Figura 101 - Complexidade <i>versus</i> métricas de erro.	283
Figura 102 - Complexidade <i>versus</i> erro máximo.	284
Figura 103 - Complexidade <i>versus</i> MAPE.	284
Figura 104 - Valores reais <i>versus</i> preditos no conjunto total.	286
Figura 105 - Resíduos no conjunto.	287

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese dos principais produtos de madeira engenheirada.	39
Tabela 2 - Distribuição da área plantada por estado em hectares.	45
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do <i>Pinus patula</i>	62
Tabela 4 - Média para as propriedades físicas e mecânicas para madeira de <i>Pinus taeda</i>	62
Tabela 5 - Valores médios de densidade a 12% de umidade e densidade básica de <i>Pinus elliottii</i> , obtidos por três métodos de determinação de densidade.	66
Tabela 6 - Bases de dados acadêmicas consultadas.	98
Tabela 7 - Banco de dados de propriedades intelectuais consultadas.	99
Tabela 8 - Principais critérios de inclusão e exclusão.	101
Tabela 9 - Estruturação das <i>strings</i> em inglês para busca nas bases acadêmicas e patentárias.	102
Tabela 10 - Estruturação das <i>strings</i> em espanhol e português para busca nas bases patentárias.	103
Tabela 11 - Sintaxes de entrada dos principais operadores booleanos em cada plataforma. .	104
Tabela 12 - Resultados volumétricos de documentos acadêmicos e patentes.	108
Tabela 13 - Representatividade numérica em porcentagem por base de dados versus <i>strings</i>	108
Tabela 14 - Relação de trabalhos provenientes de periódicos para composição basilar do estudo proposto.	118
Tabela 15 - Relação de trabalhos provenientes de conferências para composição basilar do estudo proposto.	122
Tabela 16 - Relação de trabalhos provenientes de repositórios para composição basilar do estudo proposto.	122
Tabela 17 - Comparativo de desempenho de propriedades mecânicas das vigas ensaiadas. .	124
Tabela 18 - Valores experimentais para rigidez a flexão e momento de falha.	134
Tabela 19 - Resultados comparativos entre os valores experimentais e analíticos.	138
Tabela 20 - Comparativo entre os resultados experimentais e analíticos.	145
Tabela 21 - Resultados comparativos encontrados para a rigidez à flexão e momento último.	147
Tabela 22 - Sintetização dos resultados de Christoforo <i>et al.</i> (2022).	150
Tabela 23 - Classificação das vigas por série.	155
Tabela 24 - Resumo comparativo dos efeitos dos reforços nas vigas de madeira.	156

Tabela 25 - Resultados experimentais e numéricos: validação do modelo numérico.	158
Tabela 26 - Comparativo da rigidez e da força de ruptura por tipo de reforço.	158
Tabela 27 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos.	164
Tabela 28 - Levantamento de densidades e taxas de carbonização de diferentes espécies de madeira.	168
Tabela 29 - Profundidade de carbonização e taxas de carbonização.....	170
Tabela 30 - Densidade e taxa de carbonização do <i>Southern pine</i>	171
Tabela 31 - Comparação entre profundidades de carbonização (mm).	176
Tabela 32 - Espécies de madeira e propriedades inerentes.	177
Tabela 33 - Combinações geométricas consideradas para as seções transversais das vigas de madeira	181
Tabela 34 - Relações para determinação dos módulos de elasticidade, módulos de cisalhamento e coeficientes de Poisson.	181
Tabela 35 - Propriedades constitutivas da madeira utilizadas nas simulações numéricas.	182
Tabela 36 - Relações das tensões plásticas e tensões de cisalhamento	183
Tabela 37 - Coeficientes de ponderação para tensões plásticas equivalentes	183
Tabela 38 - Propriedades mecânicas consideradas para o aço CA-50.	184
Tabela 39 - Parâmetros de estudo Soriano, Pellis e Mascia (2016).	186
Tabela 40 - Parâmetros de incrementos.....	187
Tabela 41 - Condições de contorno e interações.	188
Tabela 42 - Discretização dos elementos finitos.	188
Tabela 43 – Propriedades e condições de ensaio da viga RGlulam2-2.	189
Tabela 44 - Comparativo entre os resultados experimentais e numéricos para a viga RGlulam2-2.	197
Tabela 45 - Parâmetros do estudo de Matsushita e Shioya (2023b).....	199
Tabela 46 - Relação entre temperatura e condutividade térmica para madeira e camada carbonizada.....	202
Tabela 47 - Relação entre temperatura e calor específico para madeira.	203
Tabela 48 - Relação entre temperatura e taxa de densidade.....	204
Tabela 49 - Relação de condutividade térmica e temperatura do aço.	205
Tabela 50 - Relação entre calor específico e temperatura do aço.	205
Tabela 51 - Relação de densidade e temperatura do aço.	206
Tabela 52 - Interação entre o aço e a madeira no modelo térmico.....	207
Tabela 53 - Curva padrão de incêndio ISO-834	208

Tabela 54 - Tabela resumitiva das condições de contorno para simulações térmicas.....	209
Tabela 55 - Discretização do modelos finitos para análise térmica.	211
Tabela 56 - Coeficientes de expansão térmica ortotrópica da madeira de <i>Pinus sp.</i>	214
Tabela 57 - Variação da densidade da madeira de <i>Pinus sp.</i> em função da temperatura.	214
Tabela 58 - Localização das propriedades dos materiais para <i>input</i> no software.....	215
Tabela 59 - Parâmetros do modelo de regressão simbólica.....	225
Tabela 60 - Modelos excluídos da análise de resultados.....	227
Tabela 61 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x3000mm.	229
Tabela 62 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x4000mm.	231
Tabela 63 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x5000mm.	233
Tabela 64 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x3000mm.	235
Tabela 65 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x4000mm.	237
Tabela 66 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x5000mm.	240
Tabela 67 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x3000mm.	242
Tabela 68 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x4000mm.	244
Tabela 69 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x5000mm.	246
Tabela 70 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x3000mm.	249
Tabela 71 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x4000mm.	251
Tabela 72 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x5000mm.	253
Tabela 73 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x3000mm.	255
Tabela 74 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x4000mm.	257
Tabela 75 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x5000mm.	259
Tabela 76 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x3000mm.	260
Tabela 77 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x4000mm.	262
Tabela 78 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x5000mm.	265
Tabela 79 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x3000mm.	267
Tabela 80 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x4000mm.	269
Tabela 81 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x5000mm.	271
Tabela 82 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x3000mm.	273
Tabela 83 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x4000mm.	275
Tabela 84 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x5000mm.	277
Tabela 85 - Resumo dos resultados de ganhos de tempo de exposição ao fogo dos blocos. .	279
Tabela 86 - Métricas do modelo - treinamento.....	285

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Resumo
ANOVA	Análise de Variância
APDL	ANSYS Parametric Design Language
APP	Área de Preservação Permanente
AR-300	Adesivo de Alta Resistência
AS	Standards Australia
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWC	American Wood Council
BFRP	Basalt Fiber Reinforced Polymer
BS	British
C45	Concrete 450 MPa
CA-50	Concreto Armado – 500 MPa
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CHM-CFRP	Carbon Hybrid Mesh – Carbon Fiber Reinforced Polymer
CIP	Classificação Internacional de Patentes
CLB	Lamela Pultrada na Base
CLMS	Reivindicações
CLT	Cross Laminated Timber (Madeira Lamelada Cruzada)
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
EI	Rigidez à Flexão
EN	Europeam Committee for Standardization
EPO	Escritório Europeu de Patentes
EUA	Estados Unidos da América
FB	Fiber Basalt
FEM	Finit Element Method
FRP	Fiber Reforced Polimer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
GLT	Glued-Laminated Teimber
Glulam	Madeira Lamelada Colada
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial

ISO	International Organization for Standardization
LVDTs	Transdutores de Deslocamento Linear
LVL	Laminated Veneer Lumber (Madeira Lamelada em Lâminas)
LWP	Lenho Tardio
MLC	Madeira Lamelada Colada
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura na Resistência à Flexão
NBR	Norma Brasileira
NDS	National Design Specificatio
NFPA	National Fire Protection Association
NZS	New Zealand Standard
OMPI	Organização Mundial da Propriedade Intelectual
PCT	Cooperação em Matéria de Patentes
PIB	Produto Interno Bruto
PRF	Fenol-Resorcinol-Formaldeído
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PSL	Parallel Strand Lumber (Madeira Lamelada de Fios Paralelos)
REI	Estabilidade, Estanqueidade e Isolamento Térmico
RL	Reserva Legal
RPI	Número de Anéis por Polegada
RPPNS	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
SD390	Steel Deformed 390 MPa
SPEC	Descrição Completa
t.CO ₂ eq/ha	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente por Hectare
TI	Título
UE	União Européia
UF 0900	Unidirecional Fiberglass 900 g/m ²
UNE	Unión Espanhola
USPTO	United States Patent and Trademark Office

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Largura
d	Altura da Peça
d'	Distância entre o CG do Aço à Face Inferior da Viga
d_0	Espessura Inicial
$d_{efetiva}$	Espessura Efetiva
d_i	Espessura Inicial
$d_{inicial}$	Espessura Inicial
d_m	Distância Entre a Superfície da Viga e o Ponto de Medição de Temperatura
d_r	Espessura Remanescente
d_{res}	Espessura
f	Flecha Correspondente a Carga Aplicada
f_{c0}	Resistência a Compressão Paralela às Fibras
f_{c90}	Resistência a Compressão Perpendicular às Fibras
f_m	Excitação Externa
f_M	Resistência à Flexão Estática
f_R	Módulo de Ruptura
f_{t0}	Resistência a Tração Paralela às Fibras
f_{t90}	Resistência a Tração Perpendicular às Fibras
f_{v0}	Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras
h	Altura
h	Hora
k_0	Profundidade da Camada Adicional não carbonizada
l	Largura do Vão Entre Apoios
m	Coefficiente da Taxa de Carbonização
n	Expoente Empírico Ajustado Experimentalmente
t	Tempo de ruptura da viga em condição de incêndio
x	Espessura da Camada Carbonizada
D_b	Coefficiente de Difusão
E	Módulo de Elasticidade
E_{c0}	Módulo de Elasticidade na Compressão
E_L	Módulo de Elasticidade Longitudinal

E_R	Módulo de Elasticidade Radial
E_T	Módulo de Elasticidade Transversal
G_L	Módulo de Cisalhamento Longitudinal
G_R	Módulo de Cisalhamento Radial
G_T	Módulo de Cisalhamento Transversal
I	Momento de Inércia
L	Comprimento
P	Carga Aplicada
P_{max}	Carga Máxima Aplicada
T	Temperatura da Madeira em um ponto específico de Medição
T_c	Temperatura de Carbonização
T_r	Temperatura Ambiente da Madeira Antes da Queima
W	Deslocamento
β	Taxa de Carbonização
β_n	Taxa de Carbonização Nominal
μ	Teor de Umidade
ρ	Densidade Aparente
ρS	Massa por Unidade de Comprimento
σ	Tensão Nominal
τ	Tensão de Cisalhamento
ν_L	Coefficiente de Poisson Longitudinal
ν_R	Coefficiente de Poisson Radial
ν_T	Coefficiente de Poisson Transversal
%	Porcentagem
ΔH_S	Variação do Calor de Sorção
$\emptyset$	Diâmetro
pos $\emptyset$	Posição
q_{cv}	Fluxo de Calor Convectivo
°C	Graus Célsius
cm	Centímetros
g/cm ³	Gramas por Centímetro Cúbico
GPa	Giga Pascal
in/h	Polegadas por Hora

kg/m^3	Quilograma por Metro Cúbico
kN	Quilo Newtons
kN/mm	Quilo newtons por Milímetro
kN/mm^2	Quilo Newtons por Milímetro Quadrado
kPa	Quilo Pascal
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
mm/h	Milímetros por Hora
mm/min	Milímetros por Minuto
MPa	Mega Pascal
N	Newtons
W/m.K	Watt por Metro Kelvin
$\text{W/m}^2.\text{K}$	Watt por Metro Quadrado Kelvin

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	OBJETIVOS	32
1.1.1	Geral.....	32
1.1.2	Específicos	32
1.2	JUSTIFICATIVA	33
1.3	ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS	34
2	ASPECTOS FUNDAMENTAIS.....	37
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO LASTRO TEMÁTICO	38
2.2	DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA MADEIRA NO BRASIL	40
2.2.1	Indicadores das florestas plantadas no Brasil.....	42
2.2.2	Indicadores das florestas nativas brasileiras.....	47
2.3	PANORAMA GLOBAL DA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA.....	50
2.4	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO GÊNERO <i>PINUS</i>	53
2.4.1	Aspectos anatômicos e fatores que afetam as propriedades da madeira de <i>Pinus</i>.....	53
2.4.1.1	Classificação como madeira conífera (resinosas).....	53
2.4.1.2	Implicações anatômicas no desempenho físico-mecânico	55
2.4.1.3	Influências determinísticas dos anéis de crescimento nas propriedades da madeira de <i>Pinus</i>	56
2.4.1.4	Importância do controle da idade de corte para uso estrutural	57
2.4.1.5	Consequências no módulo de elasticidade e resistência à flexão	59
2.4.1.6	Comportamento ao cisalhamento e compressão.....	60
2.4.1.7	Crescimento rápido e implicações estruturais	63
2.4.2	Propriedades físicas do <i>Pinus</i>	64
2.4.2.1	Densidade	64
2.4.2.2	Teor de umidade	66
2.4.2.3	Retração	67
2.4.3	Propriedades mecânicas da madeira	69
2.4.3.1	Resistência à compressão paralela às fibras (fc_0)	70
2.4.3.2	Resistência à compressão perpendicular às fibras (fc_{90}).....	71
2.4.3.3	Resistência à tração paralela às fibras (ft_0).....	72
2.4.3.4	Resistência à tração perpendicular às fibras (ft_{90})	73

2.4.3.5	Resistência à flexão estática (fM).....	73
2.4.3.6	Módulo de elasticidade (E).....	74
2.4.3.7	Módulo de ruptura (fR).....	75
2.4.3.8	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).....	76
2.4.3.9	Dureza.....	77
2.4.3.10	Tenacidade.....	78
2.5	COMPORTAMENTO DA MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	79
2.5.1.1	Mecanismos de transferência de calor.....	80
2.5.1.2	Carbonização da madeira.....	81
2.5.1.3	Comportamento termoestructural da madeira de <i>Pinus</i>	88
2.5.1.4	Abordagens normativas para previsão do desempenho em incêndio	90
2.6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA... ..	92
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....	97
3.1	LEVANTAMENTO DE ESTUDOS CIENTÍFICOS INTRÍNSECOS AO OBJETIVO DO TRABALHO PROPOSTO	98
3.1.1	Bases de dados acadêmicas	98
3.1.2	Bancos de dados de patentes	99
3.1.3	<i>Strings</i> de busca.....	101
3.1.4	Sintaxes de entrada das plataformas	104
3.1.5	Apresentação dos resultados de pesquisa	105
3.2	ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS E BIBLIOGRÁFICAS	105
3.2.1	Análise dos dados bibliométricos	105
3.2.2	Análise dos dados bibliográficos	116
3.2.2.1	Análise e discussão dos estudos experimentais selecionados.....	123
3.2.2.1.1	<i>Avaliação do estudo de Luca e Marano (2012)</i>	123
3.2.2.1.2	<i>Avaliação do estudo de Matsushita e Shioya (2023a)</i>	124
3.2.2.1.3	<i>Avaliação do estudo de Matsushita e Shioya (2023b)</i>	127
3.2.2.1.4	<i>Avaliação do estudo de Matsuoka, Fukudome e Shioya (2021)</i>	129
3.2.2.1.5	<i>Avaliação do estudo de Wang et al. (2025)</i>	130
3.2.2.1.6	<i>Avaliação do estudo de Kátai-Urbán, Cimer e Lublók (2023)</i>	132
3.2.2.1.7	<i>Avaliação do estudo de Fiorelli e Dias (2011)</i>	133
3.2.2.1.8	<i>Avaliação do estudo de Soriano, Pellis e Mascia (2016)</i>	134
3.2.2.1.9	<i>Avaliação do estudo Gómez et al. (2019)</i>	136

3.2.2.1.10	<i>Avaliação do estudo Vahedian, Shrestha e Crews (2019).....</i>	137
3.2.2.1.11	<i>Avaliação do estudo Rescalvo et al. (2018).....</i>	138
3.2.2.1.12	<i>Avaliação do estudo La Rosa García, De Escamilla e González García (2013).....</i>	140
3.2.2.1.13	<i>Avaliação do estudo Nadir et al. (2016).....</i>	141
3.2.2.1.14	<i>Avaliação do estudo Rescalvo et al. (2021).....</i>	142
3.2.2.1.15	<i>Avaliação do estudo de Yang et al. (2016a).....</i>	143
3.2.2.1.16	<i>Avaliação do estudo de Fossetti, Minafò e Papia (2015).....</i>	144
3.2.2.1.17	<i>Avaliação do estudo de Raftery e Kelly (2015).....</i>	145
3.2.2.1.18	<i>Avaliação do estudo de Yang et al. (2016b).....</i>	146
3.2.2.1.19	<i>Conclusões das investigações de trabalhos experimentais.....</i>	148
3.2.2.2	<i>Análise e discussão dos estudos numéricos selecionados.....</i>	149
3.2.2.2.1	<i>Avaliação do estudo de Christoforo et al. (2022).....</i>	149
3.2.2.2.2	<i>Avaliação do estudo de Nubissie, Ngamie e Woafu (2011).....</i>	150
3.2.2.2.3	<i>Avaliação do estudo de Mascia e Simoni (2013).....</i>	151
3.2.2.2.4	<i>Avaliação do estudo de Khelifa et al. (2015).....</i>	153
3.2.2.2.5	<i>Conclusões das investigações dos trabalhos numéricos.....</i>	154
3.2.2.3	<i>Análise e discussão dos estudos experimentais e numéricos selecionados.....</i>	155
3.2.2.3.1	<i>Avaliação do estudo de Wdowiak-Postulak (2023).....</i>	155
3.2.2.3.2	<i>Avaliação do estudo de Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025).....</i>	156
3.2.2.3.3	<i>Avaliação do estudo de Raftery e Rodd (2015).....</i>	159
3.2.2.3.4	<i>Avaliação do estudo de Donadon et al. (2020).....</i>	161
3.2.2.3.5	<i>Avaliação do estudo de Raftery e Harte (2013).....</i>	162
3.2.2.3.6	<i>Avaliação do estudo de He et al. (2022).....</i>	163
3.2.2.3.7	<i>Avaliação do estudo de Corradi et al. (2018).....</i>	165
3.2.2.3.8	<i>Conclusões das investigações dos trabalhos experimentais e numéricos.....</i>	166
3.2.2.4	<i>Análise dos artigos, dissertações e teses sobre taxas de carbonização.....</i>	166
3.2.2.4.1	<i>Avaliação do estudo de Schaffer (1967).....</i>	166
3.2.2.4.2	<i>Avaliação do estudo de Babrauskas (2005).....</i>	167
3.2.2.4.3	<i>Avaliação do estudo de Nguyen et al. (2023).....</i>	169
3.2.2.4.4	<i>Avaliação do estudo de Yang et al. (2009).....</i>	171
3.2.2.4.5	<i>Avaliação do estudo de Špilák et al. (2022).....</i>	172
3.2.2.4.6	<i>Avaliação do estudo de Pečenko, Svensson e Hozjan (2015).....</i>	174
3.2.2.4.7	<i>Avaliação do estudo de Damasceno Silva (2022).....</i>	176

3.2.2.4.8	<i>Avaliação do estudo de Antunes Martins (2016)</i>	177
3.2.2.4.9	<i>Conclusões da seção: Taxas de carbonização</i>	178
3.3	CONCLUSÃO GERAL DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA .	178
4	MATERIAIS E MÉTODOS	180
4.1	MATERIAIS.....	180
4.1.1	Propriedades da madeira e critério de comportamento mecânico	180
4.1.1.1	Módulos de elasticidade e relações constitutivas	181
4.1.1.2	Resistência à compressão paralela as fibras e critério de escoamento da madeira.....	182
4.1.1.3	Tensões plásticas adotadas	182
4.1.1.4	Relações de escoamento para o critério de Hill.....	183
4.1.2	Propriedades do aço e critérios de comportamento mecânico	183
4.1.2.1	Caracterização geométrica das armaduras.....	183
4.1.2.2	Propriedades mecânicas do aço	184
4.1.2.3	Influência da temperatura nas propriedades do aço.....	185
4.1.2.4	Critério de ruptura e modelo de comportamento	185
4.2	MÉTODOS	186
4.2.1	Validação do estudo experimental em temperatura ambiente	186
4.2.1.1	Variáveis de estudo de Soriano, Pellis e Mascia (2016).....	186
4.2.1.2	Condições de apoio e carregamento	186
4.2.1.3	Estratégia de análise mecânica	187
4.2.1.4	Condições de contorno e interações em temperatura ambiente.....	187
4.2.1.5	Discretização e elementos finitos para a análise mecânica	188
4.2.1.6	Aderência do adesivo: Hipótese simplificadora	189
4.2.1.7	Validação do modelo em temperatura ambiente	189
4.2.1.8	Correlação entre as abordagens e o comportamento estrutural	190
4.2.1.9	Resultados da validação em temperatura ambiente	191
4.2.1.10	Conclusões em relação a validação em temperatura ambiente.....	196
4.2.2	Validação do estudo experimental em altas temperaturas	198
4.2.2.1	Variáveis de estudo - Matsushita e Shioya (2023b)	198
4.2.2.2	Esquema genérico de carregamento e apoio.....	199
4.2.2.3	Estratégia de análise para validação	199
4.2.2.4	Atributos iniciais do modelo numérico.....	200
4.2.2.5	Propriedades térmicas da madeira	201

4.2.2.5.1	<i>Condutividade térmica</i>	201
4.2.2.5.2	<i>Calor específico</i>	202
4.2.2.5.3	<i>Densidade</i>	203
4.2.2.6	Propriedades térmicas do aço CA-50	204
4.2.2.6.1	<i>Condutividade térmica (λ)</i>	204
4.2.2.6.2	<i>Calor específico (c)</i>	205
4.2.2.6.3	<i>Densidade (ρ)</i>	205
4.2.2.7	Incremento e solução de análise térmica	206
4.2.2.8	Condições de contorno e interações do modelo térmico	207
4.2.2.9	Discretização e elementos finitos para análise térmica	210
4.2.2.10	Resultados da validação em altas temperaturas.....	211
4.2.3	Análises termomecânicas acopladas	213
4.2.3.1	Atributos iniciais do modelo termomecânico acoplado.....	213
4.2.3.2	Propriedades dos materiais	214
4.2.3.3	Configuração do <i>Step</i>	215
4.2.3.4	Interações do modelo termomecânico acoplado	216
4.2.3.5	Condições de contorno (módulo <i>Load</i>)	217
4.2.3.6	Discretização e elementos finitos para análise termomecânica acoplada.....	218
4.2.3.7	Decorências das simulações termomecânicas acopladas	219
4.2.4	Modelo de regressão simbólica	222
4.2.4.1	Construção do banco de dados e divisão amostral	224
4.2.4.2	Considerações acerca da regressão simbólica	225
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	226
5.1	BLOCO 1 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X3000.....	228
5.1.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 1	228
5.1.2	Análise comparativa de resultados do bloco 1	229
5.1.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 1	229
5.2	BLOCO 2 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X4000.....	230
5.2.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 2	230
5.2.2	Análise comparativa de resultados do bloco 2	231
5.2.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 2	232
5.3	BLOCO 3 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X5000.....	232
5.3.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 3	232
5.3.2	Análise comparativa de resultados do bloco 3	233

5.3.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 3	234
5.4	BLOCO 4 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X3000	234
5.4.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 4	234
5.4.2	Análise comparativa de resultados do bloco 4	235
5.4.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 4	236
5.5	BLOCO 5 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X4000	236
5.5.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 5	236
5.5.2	Análise comparativa de resultados do bloco 5	237
5.5.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 5	238
5.6	BLOCO 6 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X5000	238
5.6.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 6	238
5.6.2	Análise comparativa de resultados do bloco 6	239
5.6.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 6	240
5.7	BLOCO 7 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X3000	241
5.7.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 7	241
5.7.2	Análise comparativa de resultados do bloco 7	242
5.7.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 7	242
5.8	BLOCO 8 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X4000	243
5.8.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 8	243
5.8.2	Análise comparativa de resultados do bloco 8	244
5.8.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 8	244
5.9	BLOCO 9 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X5000	245
5.9.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 9	245
5.9.2	Análise comparativa de resultados do bloco 9	246
5.9.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 9	247
5.10	BLOCO 10 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X3000	247
5.10.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 10	247
5.10.2	Análise comparativa de resultados do bloco 10	248
5.10.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 10	249
5.11	BLOCO 11 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X4000	249
5.11.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 11	249
5.11.2	Análise comparativa de resultados do bloco 11	250
5.11.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 11	251
5.12	BLOCO 12 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X5000	251

5.12.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 12.....	251
5.12.2	Análise comparativa de resultados do bloco 12	252
5.12.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 12.....	253
5.13	BLOCO 13 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X3000.....	253
5.13.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 13.....	253
5.13.2	Análise comparativa de resultados do bloco 13	254
5.13.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 13.....	255
5.14	BLOCO 14 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X4000.....	255
5.14.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 14.....	255
5.14.2	Análise comparativa de resultados do bloco 14	256
5.14.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 14.....	257
5.15	BLOCO 15 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X5000.....	257
5.15.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 15.....	257
5.15.2	Análise comparativa de resultados do bloco 15	258
5.15.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 15.....	259
5.16	BLOCO 16 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X3000.....	259
5.16.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 16.....	259
5.16.2	Análise comparativa de resultados do bloco 16	260
5.16.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 16.....	261
5.17	BLOCO 17 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X4000.....	261
5.17.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 17.....	261
5.17.2	Análise comparativa de resultados do bloco 17	262
5.17.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 17.....	263
5.18	BLOCO 18 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X5000.....	263
5.18.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 18.....	263
5.18.2	Análise comparativa de resultados do bloco 18	264
5.18.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 18.....	265
5.19	BLOCO 19 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X3000.....	266
5.19.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 19.....	266
5.19.2	Análise comparativa de resultados do bloco 19	267
5.19.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 19.....	267
5.20	BLOCO 20 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X4000.....	268
5.20.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 20.....	268
5.20.2	Análise comparativa de resultados do bloco 20	269

5.20.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 20	269
5.21	BLOCO 21 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X5000.....	270
5.21.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 21	270
5.21.2	Análise comparativa de resultados do bloco 21	271
5.21.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 21	271
5.22	BLOCO 22 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X3000.....	272
5.22.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 22	272
5.22.2	Análise comparativa de resultados do bloco 22	273
5.22.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 22	273
5.23	BLOCO 23 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X4000.....	274
5.23.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 23	274
5.23.2	Análise comparativa de resultados do bloco 23	275
5.23.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 23	275
5.24	BLOCO 24 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X5000.....	276
5.24.1	Análise do comportamento força <i>versus</i> tempo do bloco 24.....	276
5.24.2	Análise comparativa de resultados do bloco 24	277
5.24.3	Discussão técnica dos resultados do bloco 24.....	277
5.25	RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOMECÂNICAS.....	278
5.26	RESULTADOS DE ANÁLISE DA REGRESSÃO SIMBÓLICA.....	280
5.26.1	Análise multivariada	280
5.26.2	Modelo de regressão simbólica	282
5.26.3	Expressão final estimada para o tempo de resistência ao fogo (<i>t</i>).....	284
5.26.4	Acurácia do modelo proposto	285
6	CONCLUSÕES.....	288
	REFERÊNCIAS.....	293

1 INTRODUÇÃO

Como material de construção, a madeira destaca-se por uma notável combinação de propriedades mecânicas e físicas que comparadas a produtos de engenharia consagrados, como o concreto armado, a torna atrativa do ponto de vista estrutural. Esse composto natural possui uma vantagem significativa por possuir elevada resistência mecânica em relação a sua densidade (Araújo, 2002). Essa constatação é evidenciada ao se observar a densidade do concreto convencional que, segundo Sata, Wongsu e Chindaprasirt (2013) está na ordem de 2.400 kg/m³.

Do ponto de vista ambiental, a madeira é um recurso natural, renovável e biodegradável e sua utilização contribui de forma significativa para a redução do inventário de emissões de gases do efeito estufa. Durante seu ciclo de vida, atua como um reservatório de carbono, em contraste com o concreto e o aço, cujos processos produtivos são responsáveis por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂), representando uma das principais fontes de impacto ambiental na cadeia da construção civil. Além disso, a madeira apresenta menor energia incorporada, entendida como a soma da energia necessária para extrair, processar e fabricar o material ao longo de seu ciclo produtivo, quando comparada a esses materiais. (*Food and Agriculture Organization* - FAO, 2016).

Em países com tradição no uso da madeira como material construtivo, seu emprego é amplamente incentivado e regulamentado. Exemplos como o Canadá, Japão e Alemanha demonstram uso intensivo e tecnologicamente avançado da madeira tanto em edificações unifamiliares como em estruturas de médio e grande porte, como escolas, edifícios administrativos e torres residenciais. Essas nações apostam em políticas públicas, certificações e incentivos à pesquisa para ampliar o uso desse recurso renovável, dentro de critérios técnicos e ambientais rigorosos (*Natural Resources Canada* - NRC, 2025; Ludwig, G., 2019; *Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries* - MAFF, 2022).

Dentro do contexto brasileiro, seu território abriga cerca de 60% da maior floresta tropical do mundo, a floresta Amazônica, com aproximadamente 5 milhões de hectares (Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2022). Estudos apontam que no Brasil existem em torno de 11 mil a 16 mil espécies arbóreas somente na floresta Amazônica (Hubbell *et al.*, 2008; Steege *et al.*, 2016), porém estima-se que em todo território nacional esse número chegue a 31 mil espécies somente no grupo das angiospermas e mais 26 espécies de gimnospermas (Forzza, 2010). Essa realidade evidencia a potencialidade do país em relação ao uso da madeira como material de construção de alto desempenho.

Nesse aspecto, o Brasil possui imensa capacidade florestal e de biodiversidade que denota a abundância desse compósito natural (madeira) passível de utilização na construção civil nacional, especialmente em aplicações estruturais de maior escala. Paralelamente, o país enfrenta um grave *déficit* habitacional, com cerca de 6 (seis) milhões de unidades, 4,2% maior em relação ao ano de 2019 (Instituto Nacional de Geografia e Estatística - IBGE, 2024), e a madeira torna-se uma alternativa viável frente a esse desafio. Portanto, a madeira pode assumir um papel protagonista, oferecendo soluções construtivas rápidas, leves e sustentáveis.

Em situação de incêndio, a madeira apresenta um comportamento singular por oferecer uma degradação térmica gradual, ao contrário do aço que de maneira abrupta perde resistência com o aumento da temperatura interna. A carbonização periférica da madeira atua como isolante térmico, retardando a propagação do calor para as camadas internas, aumentando o tempo de resistência ao fogo (Figuerola, 2005).

Contudo, a natureza ortotrópica da madeira torna desafiadora a modelagem comportamental desse compósito natural. Suas propriedades variam conforme as direções longitudinais, radiais e tangenciais. Essa anisotropia culmina na necessidade da definição e utilização de diferentes módulos de elasticidade (E_L , E_R , E_T), coeficientes de *Poisson* (ν_L , ν_R , ν_T) e módulos de cisalhamento (G_L , G_R , G_T), conforme direções de carregamento e de crescimento (Bodig e Jayne, 1982). Apesar das suas complexidades, a madeira é considerada um material com bom desempenho estrutural, inclusive em condições de incêndio, razão que torna investigações acerca do tema relevantes no contexto da engenharia de segurança contra fogo.

Por ser um material de origem biológica, a madeira apresenta uma estrutura anatômica complexa, resultante do crescimento natural da árvore. Essa estrutura é composta por diferentes tipos de células, como fibras, vasos e parênquimas, organizadas de maneira específica ao longo dos eixos longitudinal, radial e tangencial. A orientação dessas células confere à madeira características anisotrópicas e comportamento ortotrópico (condição especial da anisotropia), pois suas propriedades variam de acordo com a direção considerada e seus eixos são independentes (Bodig e Jayne, 1982). Essa variabilidade exige, para fins de modelagem numérica e cálculo estrutural, a adoção de simplificações que permitam representar adequadamente o comportamento do material.

Na modelagem estrutural, considera-se geralmente a hipótese da existência de eixos de simetria nos três planos principais da madeira: longitudinal (ao longo das fibras), radial (do centro para fora do tronco) e tangencial (perpendicular ao radial). Essas hipóteses permitem o uso de modelos ortotrópicos simplificados, que consideram diferentes valores de módulo de

elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento para cada direção. Essa idealização, embora simplificadora, permite obter resultados confiáveis nas análises de estruturas de madeira, especialmente quando validados por ensaios experimentais ou calibrações numéricas (Frangi e Fontana, 2005).

A simulação numérica é uma ferramenta importante para a análise de estruturas, permitindo a investigação de fenômenos físicos e mecânicos com elevado nível de detalhe. No caso das estruturas de madeira, ela possibilita avaliar o comportamento em diferentes condições de carregamento, umidade e temperatura, inclusive em situações de incêndio (Frangi *et al.*, 2009). Por meio de *softwares* de elementos finitos, é possível simular o processo de carbonização, a perda progressiva de rigidez e resistência, bem como o efeito de reforços metálicos embutidos.

Nos últimos anos, estudos têm empregado a simulação numérica para investigar o comportamento de elementos de madeira com diferentes tipos de reforços, especialmente sob ação térmica, pois resultados obtidos propõem de forma indireta que a rigidez dos elementos de madeira aumenta com a utilização de reforços. Esses trabalhos evidenciam a importância de modelagens avançadas para a compreensão dos mecanismos de falha e para a otimização de soluções construtivas.

Essas simulações podem ser validadas com base em resultados experimentais disponíveis na literatura, o que permite obter modelos confiáveis e representativos da realidade. Essa prática, conhecida como validação numérica, é essencial para garantir que os modelos computacionais estejam coerentes com o comportamento físico do sistema (Ribas Junior *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2024). Além disso, a possibilidade de realizar estudos paramétricos com diferentes geometrias, materiais e condições de contorno permite explorar cenários variados, sem a necessidade de múltiplas campanhas experimentais.

Embora a simulação numérica não substitua os ensaios experimentais, ela permite uma redução significativa nos custos e no tempo de desenvolvimento de projetos. A execução de testes em laboratório, especialmente envolvendo situações de incêndio, demanda infraestrutura específica, normas de segurança e materiais de consumo, o que eleva consideravelmente os custos (Frangi e Fontana, 2005). Assim, a simulação aparece como ferramenta complementar essencial no processo de projeto, contribuindo para a tomada de decisão técnica de forma mais eficiente.

A compreensão do comportamento da madeira em condição de incêndio é essencial para subsidiar profissionais com informações fidedignas para a criação de projetos mais seguros e para a criação de normatizações específicas que contemplem esse tipo de situação. Buscou-se,

com este trabalho, contribuir dentro desse campo técnico, propondo uma investigação por meio de simulações numéricas do comportamento de vigas de madeira reforçadas com barras de aço em situação de incêndio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Investigar a influência da incorporação de barras de aço no aumento do tempo requerido ao fogo de vigas de madeira até o Estado Limite Último, por meio de análises numéricas envolvendo simulações mecânicas, térmicas e termomecânicas acopladas, utilizando as propriedades físicas e mecânicas do gênero *Pinus sp.*

1.1.2 Específicos

- a. Levantar um embasamento teórico e científico detalhado sobre o comportamento de estruturas de madeira com reforço em situação de ambiente e de incêndio a partir de uma revisão sistemática de literatura de artigos científicos indexados nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct* utilizando o protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA);
- b. Levantar os registros de propriedade intelectual relacionados ao tema a partir de uma busca sistemática de patentes registradas nos bancos de dados *Espacenet*, *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), *Patentscope* (*World Intellectual Property Organization* – WIPO) e Instituto Nacional da Propriedade Industrial INPI);
- c. Investigar a influência da variação do comprimento (l) de vigas de madeira de *Pinus sp.* reforçadas com barra de aço CA-50 em relação ao aumento do tempo requerido ao fogo;
- d. Investigar a influência da variação de dimensões da seção transversal [Altura (h) Largura (b)] de vigas de madeira *Pinus sp.* reforçadas com barra de aço CA-50 em relação ao aumento do tempo requerido ao fogo;
- e. Investigar a influência da variação do diâmetro ($\emptyset$) das barras de aço CA-50 no aumento do tempo requerido ao fogo de vigas de madeira de *Pinus sp.*;

- f. Investigar a influência da variação da posição (pos $\emptyset$) da barra de aço CA-50 a 1/4. h e a 1/6. h da face inferior e seu impacto em relação aumento do tempo requerido ao fogo de vigas de madeira de *Pinus sp.*
- g. Empregar regressão simbólica sobre os resultados termomecânicos obtidos, visando à formulação de uma equação de referência que permita estimar o tempo de resistência ao fogo de vigas de madeira de *Pinus sp.* reforçadas com barras de aço, a partir de parâmetros geométricos e de reforço.
- h. Desenvolver um modelo baseado em regressão simbólica com o objetivo de identificar uma expressão matemática capaz de estimar o tempo de ruptura de vigas expostas à ação do fogo, a partir de parâmetros geométricos e mecânicos relevantes, permitindo a obtenção de uma formulação analítica aplicável a análises paramétricas e estimativas preliminares de desempenho estrutural.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a crescente necessidade por soluções construtivas sustentáveis e eficientes tem impulsionado o interesse técnico e científico pela utilização da madeira como material estrutural. No cenário brasileiro, embora gêneros florestais economicamente viáveis provenientes de florestas renováveis, como o *Pinus*, estejam amplamente disponíveis, sua utilização como madeira serrada em elementos estruturais destinados a edificações de médio e grande porte ainda pode ser significativamente ampliada. Esse cenário está relacionado, em parte, às lacunas ainda existentes no entendimento do comportamento termomecânico da madeira em situações extremas, como a exposição ao fogo, e à ausência de diretrizes normativas plenamente consolidadas que orientem seu dimensionamento seguro inseridas no contexto termoestrutural. Dentre os fatores críticos a serem considerados em projetos de segurança contra incêndio, destaca-se a capacidade da madeira de manter estabilidade estrutural mesmo sob altas temperaturas, comportamento esse fortemente influenciado pela carbonização progressiva do material e pela degradação gradual de suas propriedades mecânicas.

Nesse sentido, compreender o desempenho termoestrutural de elementos de madeira submetidos à ação do fogo é de fundamental importância para a consolidação da madeira como alternativa viável aos materiais convencionais, como o aço e o concreto. A utilização de reforços metálicos, especialmente barras de aço embutidas, surge como uma estratégia muito promissora para elevar a capacidade resistente da madeira, colaborando na mitigação dos efeitos da redução da seção transversal decorrente da carbonização e na proteção dos elementos

metálicos frente a exposição direta durante condições agressivas. Contudo, a incorporação desses reforços altera o comportamento do sistema híbrido madeira-aço e demanda investigações aprofundadas quanto aos efeitos térmicos e mecânicos resultantes dessa interação.

A presente pesquisa se justifica pela inexistência de estudos numéricos sistematizados que avaliem a influência da inclusão de barras de aço no aumento do tempo requerido ao fogo de vigas de madeira. Por meio de modelagens numéricas desenvolvidas em software de elementos finitos, buscou-se preencher essa lacuna, oferecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de práticas de projeto e para o desenvolvimento de futuras normativas nacionais e internacionais. Além disso, os resultados esperados poderão contribuir diretamente para o aumento da confiabilidade no uso da madeira em sistemas estruturais híbridos, promovendo a adoção de soluções mais leves, sustentáveis e compatíveis com os desafios contemporâneos da construção civil.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está organizado conforme a seguinte estrutura:

Capítulo 1 - Introdução, a presente parte apresentou o contexto geral da pesquisa, destacando a madeira como material estrutural relevante, sobretudo por suas propriedades mecânicas e vantagens ambientais frente a materiais tradicionais como o aço e o concreto. São discutidos aspectos relacionados ao uso sustentável da madeira, com ênfase no contexto brasileiro, caracterizado pela ampla disponibilidade de recursos florestais e pelo potencial de expansão de sua aplicação como material estrutural.

O capítulo também delineou os objetivos geral e específicos do estudo, além de justificar a relevância científica e prática da investigação proposta, considerando o desempenho da madeira em situações de incêndio e a possibilidade de melhoria desse comportamento mediante o uso de reforços metálicos.

Capítulo 2 - Aspectos Fundamentais, são expostos os fundamentos teóricos e contextuais essenciais para a compreensão do tema investigado. Inicia-se com uma análise da utilização da madeira no Brasil, evidenciando suas potencialidades e as barreiras que atêm sua adoção de forma mais ampla na construção civil. Em seguida, apresenta-se um panorama global sobre a aplicação da madeira engenheirada em sistemas construtivos modernos, demonstrando exemplos internacionais de sucesso.

Não obstante, a seção detalha as características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira do gênero *Pinus*, ressaltando as influências da idade, condições de cultivo e anatomia sobre suas propriedades. Também é discutido o comportamento da madeira sob condições de incêndio, contemplando aspectos como transferência de calor, carbonização e degradação de propriedades mecânicas. Não obstante, aborda-se as principais normas técnicas em âmbito global e suas premissas evidenciando as normas que tratam do contexto termomecânico e as que possuem essa limitação temática. Por fim, destaca-se a importância da simulação numérica como ferramenta indispensável para estudar o comportamento termomecânico de elementos de madeira, sobretudo quando reforçados com barras de aço.

Capítulo 3 - Revisão de Literatura, reúne um amplo levantamento de trabalhos correlatos, abrangendo tanto estudos acadêmicos quanto bancos de dados de patentes, para mapear o estado da arte sobre estruturas de madeira reforçadas, especialmente em condição de incêndio. Essa seção apresenta as bases de dados consultadas, os critérios de busca utilizados e os resultados obtidos, incluindo análises bibliométricas que quantificam a produção científica relacionada ao tema. São discutidas diversas investigações experimentais e numéricas que avaliam o comportamento mecânico e térmico da madeira em situações de incêndio, com destaque para ensaios específicos que servirão de referência para a modelagem numérica desenvolvida no presente trabalho. Além disso, explora estudos sobre as taxas de carbonização da madeira e suas implicações para o dimensionamento estrutural, encerrando-se com conclusões que evidenciam lacunas ainda existentes na literatura e que justificam a proposta desta pesquisa.

Capítulo 4 - Materiais e Métodos, são detalhados os procedimentos que serão devidamente empregados para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, descreve-se o processo de validação do modelo numérico em temperatura ambiente, fundamentado em resultados experimentais disponíveis na literatura. Em seguida, aborda-se a validação em altas temperaturas, condição indispensável para simular adequadamente o comportamento da madeira sob ação do fogo. O capítulo também expõe a análise paramétrica realizada, destinada a investigar a influência de variáveis como comprimento das vigas, dimensões da seção transversal, diâmetro das barras de aço CA-50 e posição dos reforços no desempenho estrutural das vigas de madeira do gênero *Pinus*.

Capítulo 5 - Resultados e Discussão, apresenta de forma sistematizada os resultados obtidos a partir das análises termomecânicas acopladas realizadas via método dos elementos finitos. Os resultados são organizados em blocos de estudo, conforme as diferentes combinações geométricas das vigas analisadas, permitindo a avaliação comparativa do

comportamento força versus tempo sob exposição ao fogo. São discutidos os efeitos da variação do comprimento das vigas, das dimensões da seção transversal, do diâmetro e da posição das barras de aço CA-50 no desempenho termoestructural do sistema híbrido madeira-aço. A discussão técnica fundamenta-se na interpretação física dos fenômenos observados, na comparação entre modelos reforçados e não reforçados e na identificação de tendências globais de aumento do tempo requerido ao fogo, servindo de base para a proposição de relações representativas do comportamento estrutural em situação de incêndio.

Capítulo 6 - Conclusões, reúne as principais conclusões decorrentes do desenvolvimento da pesquisa, sintetizando os resultados mais relevantes obtidos nas análises numéricas e discutindo a influência efetiva do reforço com barras de aço no aumento do tempo de resistência ao fogo de vigas de madeira do gênero *Pinus*. O capítulo destaca as contribuições técnicas do estudo, as limitações inerentes às hipóteses de modelagem adotadas e o potencial de aplicação dos resultados no contexto do projeto estrutural e da segurança contra incêndio. Por fim, são apresentadas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros, indicando possibilidades de aprofundamento experimental, refinamento dos modelos numéricos e ampliação do escopo para outras espécies de madeira e configurações de reforço.

2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos e contextuais que sustentam o desenvolvimento desta pesquisa, abordando os principais conceitos relacionados ao uso da madeira como material estrutural, seu comportamento em situação de incêndio e os avanços relacionados às simulações numéricas de elementos estruturais.

Inicialmente, discorre-se sobre os desafios e as potencialidades da madeira no cenário brasileiro, evidenciando a ampla disponibilidade de recursos florestais no país e as razões que ainda limitam sua aplicação em larga escala na construção civil. São discutidos fatores como a carência de políticas públicas de incentivo, de normativas específicas e o preconceito técnico-cultural historicamente associado ao uso da madeira.

Na sequência, será apresentado um panorama global da utilização da madeira em sistemas construtivos modernos, com destaque para países que têm adotado com sucesso a madeira engenheirada em edificações de médio e grande porte. São abordadas as vantagens técnicas, ambientais e econômicas desses sistemas, especialmente no contexto da construção sustentável.

O capítulo também trata das características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira do gênero *Pinus*, comercialmente utilizada no Brasil em razão de seu rápido crescimento, facilidade de manejo e boas propriedades estruturais. Destacam-se as variações naturais do material, influenciadas por fatores como idade da árvore, condições de cultivo e composição anatômica.

Outro aspecto central abordado refere-se ao comportamento da madeira em situação de incêndio, incluindo os mecanismos de transferência de calor, o processo de carbonização e os efeitos da temperatura sobre as propriedades mecânicas do material. São discutidas as abordagens normativas nacionais e internacionais utilizadas para estimar a resistência ao fogo de elementos de madeira.

Por fim, explora-se as potencialidades da simulação numérica no estudo de estruturas de madeira, destacando sua importância como ferramenta complementar à experimentação física, especialmente na avaliação do desempenho térmico e estrutural de componentes reforçados, como vigas de madeira com barras de aço embutidas.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO LASTRO TEMÁTICO

A utilização da madeira, prática ancestral em diversas culturas, renova-se e ganha espaço no contexto contemporâneo da engenharia e arquitetura moderna e sustentável. A crescente preocupação com os impactos gerados pela construção civil em torno do mundo, fez a madeira ressurgir como um produto estratégico, haja visto seu potencial como recurso renovável, sua capacidade de armazenamento de CO₂ ajudando na redução da pegada de carbono e pelo fato de demandar menor energia incorporada em sua produção em comparação a materiais tradicionais, como o concreto e o aço (Hildebrandt, Hagemann e Thrän, 2017; Himes e Busby, 2020).

O emprego da madeira proporciona várias vantagens, podendo-se destacar em termos estruturais, sua elevada resistência mesmo com densidades abaixo de 1.000 kg/m³, resultando em estruturas mais leves e, portanto, uma menor transferência de cargas para fundações que por consequência são menos robustas. Outras vantagens inerentes, como sua boa capacidade de isolamento térmico e acústicos, além da facilidade de manuseio e execução de obras em tempos relativamente menores, também são características desse material (Asdrubali *et al.*, 2017).

O advento da madeira engenheirada proporcionou a utilização desse material com todo seu potencial construtivo. Métodos industrializados se destacam pela eficiência e pela redução do tempo total de obra, e essa praticidade se reflete diretamente na produtividade dos canteiros de obras, reduzindo o tempo de execução e os custos operacionais (De Araujo *et al.*, 2022a). A baixa densidade do material contribui para sistemas construtivos mais leves, além da madeira ser um material que permite seu emprego em conjunto com outros materiais e gerar agilidade na montagem das obras e controle de gastos já que o processo é industrializado (Molina e Calil, 2010).

Esses avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de produtos que aumentaram a confiabilidade dos elementos e ampliaram as possibilidades de aplicação estrutural da madeira, como elencados na [Tabela 1](#).

A madeira *in natura* quando sofre algum tipo de processo de melhoramento industrial (madeira engenheirada), supera várias limitações da madeira maciça tradicional, como a variabilidade dimensional, redução de defeitos naturais como nós e fendas, e a baixa resistência à propagação de esforços perpendiculares às fibras.

Pelo contexto estrutural, é fato que a madeira apresenta inúmeras vantagens, entretanto a observância a algumas questões intrínsecas ao material deve ser criteriosamente considerada quando da elaboração do projeto e durante a execução de obras. Por ser um compósito natural,

a madeira possui vulnerabilidade a agentes biológicos, como fungos, cupins e brocas, exigindo tratamentos preservativos adequados e detalhamento construtivo que minimize o contato com a umidade e facilite a ventilação (Wang *et al.*, 2018).

Tabela 1 - Síntese dos principais produtos de madeira engenheirada.

Termo em Português	Termo em Inglês	Descrição Técnica	Principais Aplicações
Madeira Lamelada Colada (MLC)	Glued-Laminated Timber (GLT / Glulam)	Produzida pela colagem de lâminas de madeira com orientações alternadas, resultando em elevada resistência mecânica e possibilidade de fabricar elementos curvos ou de grandes dimensões.	Vigas, arcos, treliças, pórticos, elementos curvos e componentes estruturais de grandes vãos.
Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC)	Cross-Laminated Timber (CLT)	Composta por camadas cruzadas de madeira maciça coladas entre si, conferindo elevada rigidez e estabilidade em duas direções principais.	Painéis estruturais, lajes, pisos, paredes, núcleos estruturais e edificações de múltiplos andares.
Madeira Microlamelada (MML)	Laminated Veneer Lumber (LVL)	Fabricada pela colagem de lâminas finas de madeira orientadas paralelamente, resultando em alta resistência e estabilidade dimensional.	Vigas, pilares, caibros, montantes e elementos sujeitos a grandes vãos.
Madeira de Lascas Lameladas (MLL)	Laminated Strand Lumber (LSL)	Produzida a partir de lascas de madeira orientadas e coladas, apresentando bom desempenho mecânico e propriedades homogêneas.	Pilares, vigas secundárias, montantes estruturais e painéis.
Madeira de Lascas Paralelas (MLP)	Parallel Strand Lumber (PSL)	Fabricada pela colagem de tiras longas e paralelas de madeira, proporcionando elevada resistência e capacidade de carga.	Vigas principais, pilares robustos, elementos de grandes alturas e componentes submetidos a elevadas solicitações estruturais.

Fonte: Falk *et al.* (2010).

A combustibilidade natural também deve ser aventada, pois impõe a necessidade de requisitos de proteção contra incêndio, devendo ser impostas estratégias para aumentar o tempo requerido ao fogo de elementos estruturais. Não obstante, a variação higroscópica da madeira merece atenção, já que a madeira pode apresentar deformações e fendilhamentos, comprometendo o desempenho estrutural devido a absorção ou perda de umidade (Glass e Zelinka., 2021).

É importante ter a compreensão de que esse comportamento do material demanda um controle rigoroso desses aspectos, principalmente na etapa de armazenamento e durante a vida útil da estrutura, garantindo que a madeira tenha sua capacidade total em termos de comprometimento ao desempenho mecânico, evitando que agentes naturais e intempéries comprometam sua resistência, rigidez e estabilidade dimensional. Portanto, práticas de acondicionamento em ambientes controlados são essenciais para garantir durabilidade e segurança da estrutura ao longo do tempo.

Diante das suas características técnicas, ambientais e econômicas, a madeira ocupa uma posição singular e estratégica no futuro da construção civil, sobretudo na tangente da transição para cidades mais sustentáveis e resilientes. É necessário portanto, para maximização de seus benefícios, que os projetos considerem suas propriedades específicas, técnicas construtivas adequadas e uma abordagem consciente da gestão dos recursos florestais.

2.2 DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA MADEIRA NO BRASIL

A construção civil brasileira, tradicionalmente calcada no uso do concreto armado, ainda resistia à inovação por falta de capacitação técnica e de políticas públicas de fomento até meados de 2010. A valorização da madeira como elemento estrutural requeria uma mudança de paradigma, apoiada em dados científicos, formação profissional e demonstrações práticas de sua viabilidade econômica, ambiental e técnica (Molina e Calil, 2010).

A relação ao cenário descrito até 2010, a realidade brasileira do setor de construções em madeira avançou de forma significativa na última década, evidenciando uma maturação técnica, produtiva e normativa que contrasta diretamente com o panorama de resistência apontado por Molina e Calil (2010). Estudos recentes mostram que o país desenvolveu um mercado ativo, com ampla diversidade de técnicas, do artesanal ao industrial e com desempenho competitivo em relação à alvenaria tanto em tempo de execução quanto em custos (De Araujo *et. al*, 2022a; De Araujo *et. al*, 2022b).

Além disso, a consolidação de redes de conhecimento e a crescente participação de empresas em eventos técnicos e científicos ilustram um amadurecimento setorial e uma busca constante por atualização e inovação (De Araujo e Garcia, 2024). No campo regulatório, embora desafios persistam, o setor passou a demandar e utilizar normas, certificações e diretrizes específicas, contribuindo para maior padronização, qualidade e inserção da madeira engenheirada em edificações de maior porte, incluindo edifícios de múltiplos pavimentos (De Araujo, 2023).

Portanto, o Brasil vivencia uma transição concreta de um contexto de desconhecimento e resistência para um cenário de expansão técnica, econômica e institucional, no qual a madeira se consolida como solução estratégica para a construção sustentável contemporânea.

O desenvolvimento de normativas técnicas, como a NBR 7190:2022 e NBR 16936 para o sistema construtivo *light-woodframe*, e a criação de programas governamentais, tal qual o programa do Ministério do Meio Ambiente (2024), voltados à habitação social com madeira reforçam uma mudança do cenário nacional e, com isso, podem catalizar essa transformação do mercado interno da construção.

Para a construção civil, responsável por um alto consumo de energia e recursos naturais, a madeira por se tratar de um material renovável e reciclável, é uma opção ecologicamente viável, especialmente se oriundas de florestas manejadas de forma sustentável (FAO, 2016). O incentivo ao uso da madeira contribui para a mitigação dos impactos ambientais ocasionados pelo setor, observando-se a necessidade de alinhamento com políticas públicas de reflorestamento e rastreabilidade da cadeia produtiva.

No Brasil, o uso estrutural da madeira ainda é secundário, o que é contraditório, haja visto que é uma matéria-prima abundante e de fácil acesso por todo território nacional (Ministério do Meio ambiente - MMA, 2024).

Todavia, estruturas de madeira elaboradas, como a cobertura do centro de convenções Ulisses Guimarães em Brasília ([Figura 1](#)), demonstram que a madeira pode atender com excelência a requisitos técnicos e estéticos de obras de grande porte.

O primeiro edifício brasileiro com estrutura de madeira engenheirada ([Figura 2](#)), localizado em São Paulo, possui quatro pavimentos e representa um estímulo para a construção civil nacional. A obra utiliza *Cross Laminated Timber* (CLT) como principal elemento estrutural, evidenciando a capacidade do material de atender aos requisitos normativos de segurança, conforto e desempenho. Esse projeto também impulsiona o desenvolvimento da cadeia produtiva da madeira engenheirada já existente no Brasil, possibilitando investimentos em tecnologia, capacitação e sustentabilidade. Sua existência corrobora para a viabilidade econômica e ambiental dessa solução e abre caminhos para cidades mais sustentáveis e resilientes.

A partir desse conjunto de evidências, torna-se manifesto que a construção civil brasileira atravessa um ponto de inflexão histórico no que se refere ao uso da madeira como material estrutural. O que antes se caracterizava por resistência cultural, limitações técnicas e ausência de políticas públicas específicas transforma-se, hoje, em um cenário de inovação, diversificação produtiva e fortalecimento institucional. A ampliação das normativas, o avanço

da madeira engenheirada, o surgimento de edifícios de múltiplos pavimentos e o engajamento crescente entre empresas, academia e governo demonstram que o país está consolidando as bases para um setor mais sustentável, tecnologicamente robusto e alinhado às demandas contemporâneas por eficiência ambiental. Assim, a madeira assume progressivamente sua função estratégica no desenvolvimento de uma construção civil mais moderna, competitiva e comprometida com a transição ecológica no Brasil.

Figura 1 - Centro de Convenções Ulisses Guimarães.



Fonte: <https://www.viberate.com/venue/centro-de-convencoes-ulysses-guimaraes-ccug/>
Acessado em 23/04/2025 às 14h

Figura 2 - Primeiro edifício multipavimentos do Brasil.



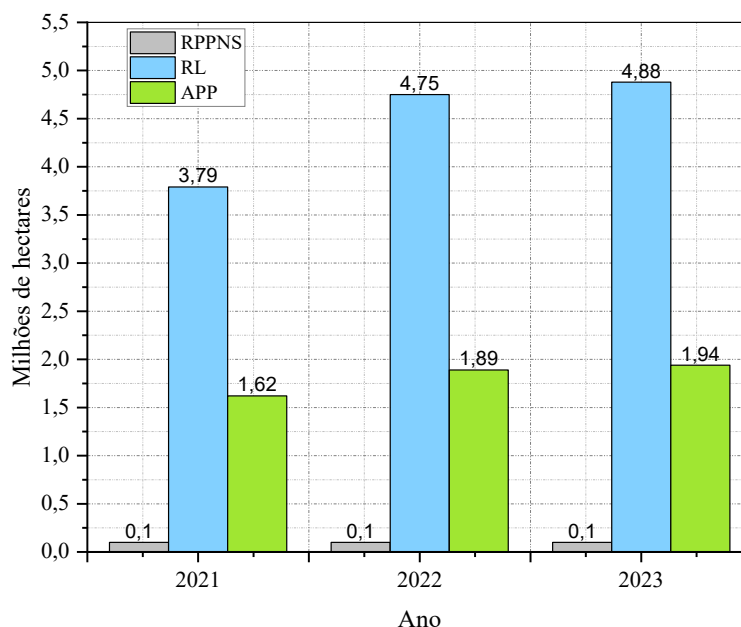
Fonte: <https://kozowood.com/jornal/o-1-edificio-de-varios-pisos-de-madeira-no-brasil>
Acessado em 29/04/2025 às 13:47h

2.2.1 Indicadores das florestas plantadas no Brasil

Em virtude à sua vasta extensão territorial e diversidade climática, o Brasil apresenta condições amplamente favoráveis para o desenvolvimento de florestas nativas e plantadas. Ao tratarmos das práticas do setor florestal, destacam-se e consolidam-se os mosaicos florestais, que se intercalam em plantios produtivos e áreas de conservação, formando os chamados corredores ecológicos. No ano de 2023 a área conservada na cadeia de árvores cultivadas

chegou a 6,92 milhões de hectares (Figura 3), considerando 4,8 milhões de hectares da floresta legal (RL) (Industria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2024).

Figura 3 - Áreas de conservação do setor de árvores cultivadas.



Fonte: Adaptado de IBÁ (2024).

Nota: RPPNS - Reservas Particulares do Patrimônio Natural; RL - Reserva Legal; APP - Área de Preservação Permanente.

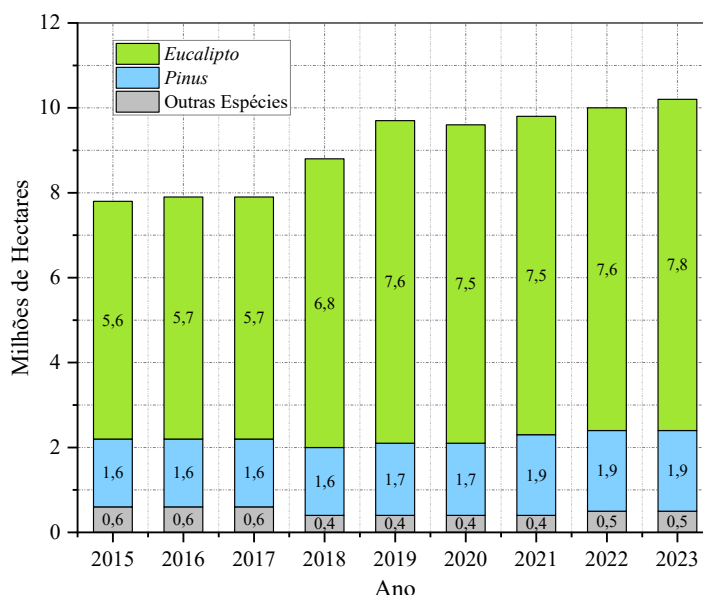
Em termos de áreas cultivadas, o país ultrapassou a marca histórica de 10 milhões de hectares de florestas plantadas, um crescimento de 3% em relação ao ano anterior. Dentre os tipos de plantio destacam-se os gêneros *Eucalipto* e *Pinus*, representando juntas 94,81% da área total cultivada (Figura 4), onde o plantio de *Pinus* cobre uma área de 1,9 milhão de hectares, correspondendo a 19% da área cultivada no Brasil (IBÁ, 2024).

O estoque de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) em florestas produtivas é estimado em 1,86 bilhão de toneladas, enquanto nas florestas naturais destinadas à conservação esse valor alcança 3,06 bilhões de toneladas. De acordo com dados coletados entre as associadas do setor, em 2022, a estimativa do estoque médio de carbono na biomassa das florestas plantadas foi de 182,59 t.CO₂eq/ha. Esses números confirmam a expressiva contribuição das florestas plantadas para a mitigação das mudanças climáticas, reforçando sua importância estratégica na captura e no armazenamento de carbono atmosférico (IBÁ, 2024).

Na prática, a capacidade das florestas plantadas de reter carbono se traduz em benefícios ambientais relevantes, como a redução do efeito estufa e a contribuição para o cumprimento de metas globais de descarbonização. Além disso, o manejo sustentável dessas áreas permite

conciliar a produção de matéria-prima renovável com a conservação dos serviços ecossistêmicos, ampliando os impactos positivos sobre a biodiversidade.

Figura 4 - Distribuição de área plantada no Brasil por gênero.



Fonte: Adaptado de *Canopy Remote Sensing Solutions (CANOPY)* | www.canopyrss.tech (2023).
Acessado em 26/04/2025 às 22:20h

No âmbito das potencialidades, cabe destacar que no Brasil, a maioria dos estados brasileiros possuem as chamadas florestas plantadas (Tabela 2), evidenciando a capacidade produtiva do país em atender tanto as demandas internas quanto as necessidades do mercado internacional. Em 2023, a cadeia produtiva do setor florestal registrou uma participação no PIB de 1,2%, representando 24% da contribuição total do setor da construção civil na economia brasileira, que corresponde a 5% da economia nacional (IBÁ, 2024).

No contexto da competitividade global, essa expressiva base florestal oferece ao Brasil uma vantagem estratégica, sobretudo diante do aumento da demanda mundial por materiais renováveis e de baixa pegada de carbono. A presença consolidada de florestas naturais, como a de *Pinus*, gênero de rápido crescimento e amplamente utilizada pela indústria de base florestal, permite ao país avançar na produção de madeira engenheirada, painéis estruturais, componentes industrializados e soluções modulares, produtos que vêm ganhando destaque em mercados influenciados pelas agendas de descarbonização e construção sustentável. Além disso, a proximidade entre polos de produção florestal e centros industriais reduz custos logísticos, ampliando a competitividade do setor e favorecendo a atração de novos investimentos nacionais e estrangeiros voltados à construção em madeira.

Tabela 2 - Distribuição da área plantada por estado em hectares.

Estado	<i>Eucalipto</i>	<i>Pinus</i>	Outros	Total
Minas Gerais	2.200.351	64.211	27.769	2.262.331
Mato Grosso do Sul	1.329.132	3.733	22.580	1.355.445
São Paulo	997.543	153.051	130.259	1.280.853
Paraná	438.721	710.837	10.393	1.159.951
Santa Catarina	326.134	719.199	4.993	1.050.326
Rio Grande do Sul	616.976	286.922	70.108	974.006
Bahia	643.094	41	13.673	656.809
Maranhão	290.076	-	12.300	302.376
Espírito Santo	263.946	1.982	14.675	280.604
Mato Grosso	128.057	721	82.193	210.971
Pará	175.125	35	32.972	208.132
Goiás	143.180	6.238	22.943	172.361
Tocantins	101.625	-	7.561	109.186
Amapá	85.386	109	173	85.668
Piauí	32.062	-	260	32.321
Rio de Janeiro	28.450	65	357	28.873
Roraima	-	-	22.522	22.522
Alagoas	16.965	-	5	16.970
Rondônia	2.588	7.751	2.066	12.405
Sergipe	3.904	-	-	3.904
Pernambuco	1.289	-	133	1.421
Ceará	78	-	578	656
Amazonas	390	-	-	390
Acre	23	-	141	164
Paraíba	143	-	-	143
Rio Grande do Norte	44	-	-	44
Total	7.825.282	1.924.894	478.654	10.228.830

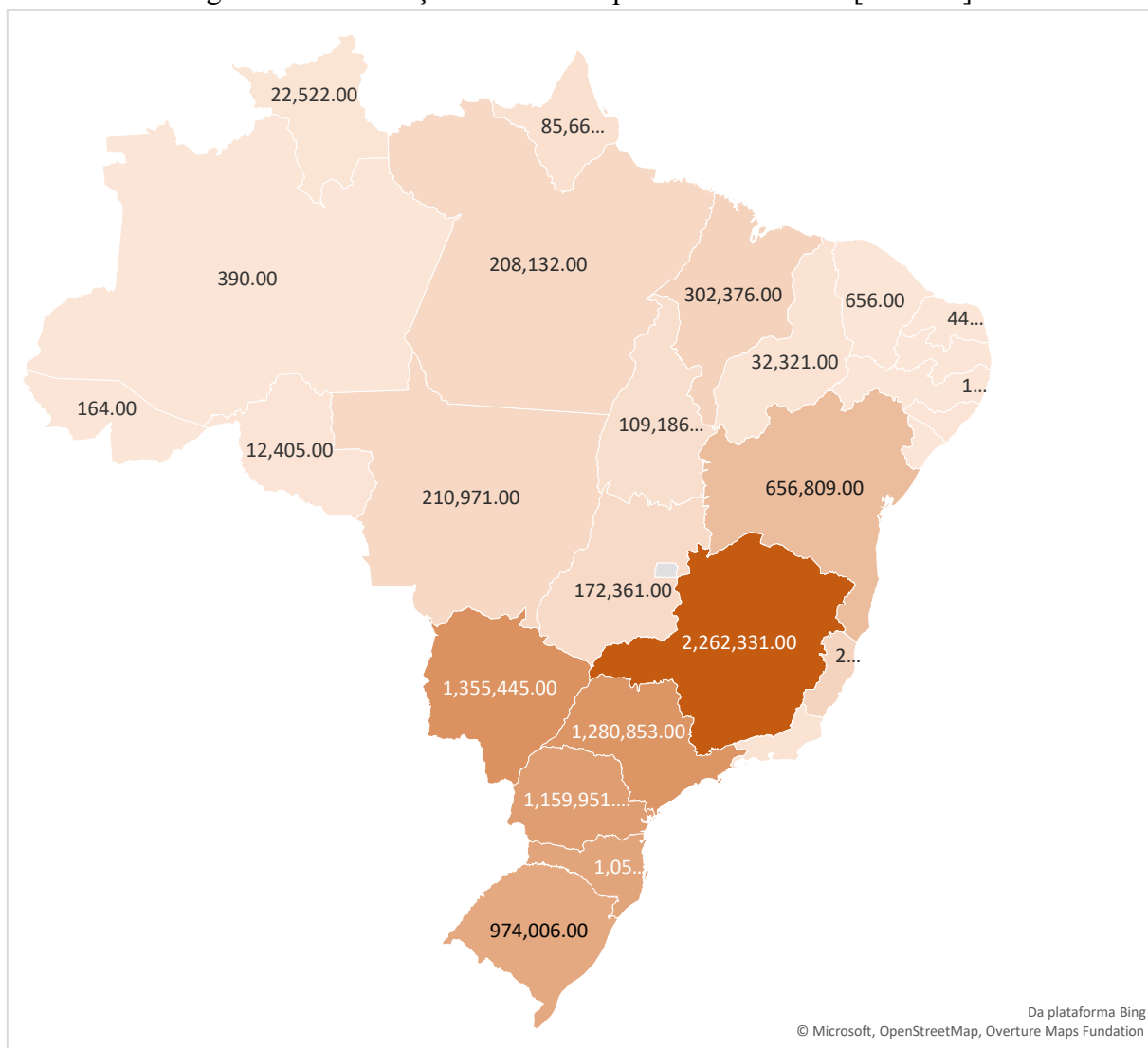
Fonte: Adaptado de CANOPY (2023).

Os principais estados produtores de florestas plantadas são os estados do Sul e Sudeste do Brasil e o Mato Grosso do Sul no centro-oeste. Esses estados juntos possuem a marca de 8.082.912 hectares, somando 79% das florestas renováveis do país (IBÁ, 2024). A [Figura 5](#) apresenta o mapa de calor da distribuição de florestas plantadas.

Somado a isso, observa-se um crescente movimento de integração territorial e desenvolvimento regional fomentado pela atividade florestal. Em muitos municípios de pequeno e médio porte, a presença de plantações e indústrias de base florestal impulsiona a geração de empregos, a qualificação profissional e a diversificação econômica. Esses efeitos multiplicadores contribuem diretamente para o desenvolvimento local e ampliam a capacidade de inovação da cadeia produtiva. À medida que estados produtores fortalecem suas políticas de apoio ao setor, seja por meio de incentivos fiscais, infraestrutura logística ou programas de capacitação, a tendência é que o Brasil aprofunde sua inserção no mercado global de madeira

estruturada e consolida um ciclo virtuoso de sustentabilidade, produtividade e desenvolvimento socioeconômico.

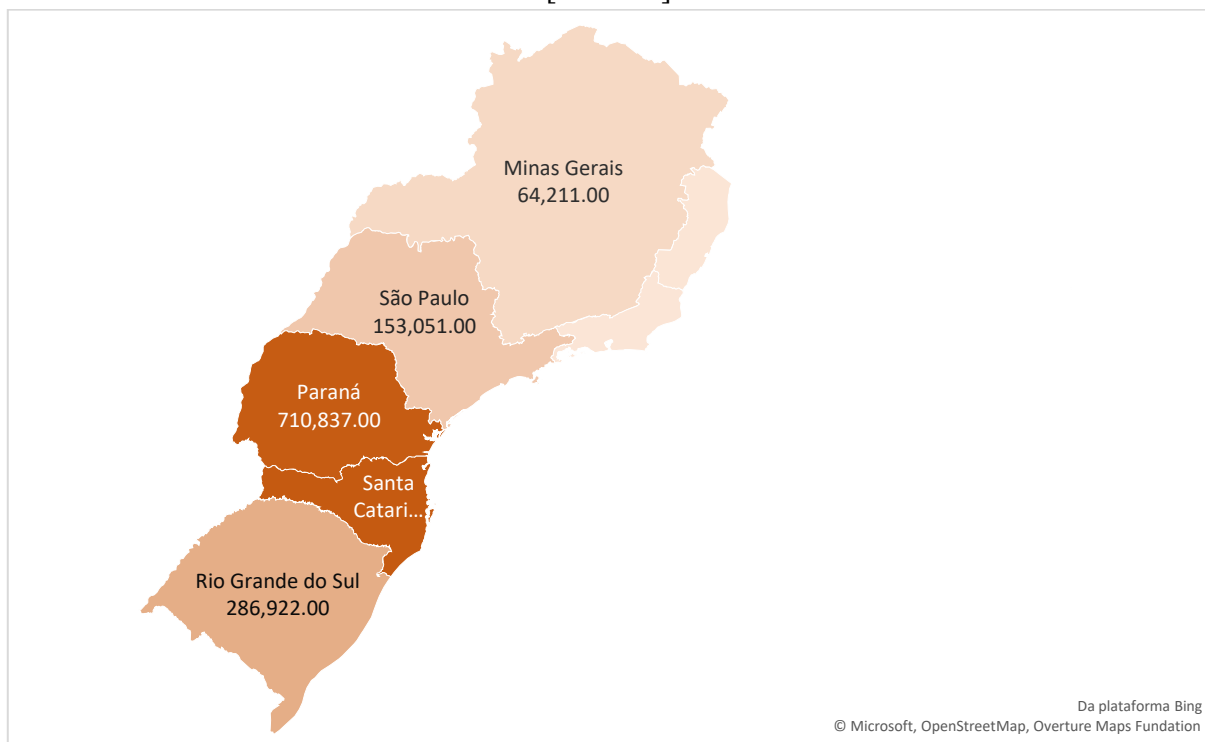
Figura 5 - Distribuição de florestas plantadas no Brasil [hectares].



Fonte: Adaptado de CANOPY (2023).

A concentração do plantio de *Pinus* ocorre predominantemente na região Sul do país com 89% da produção nacional, seguido pelo Sudeste com 10% das áreas totais plantadas. Isso se deve em especial as condições edafoclimáticas, como o clima temperado e os solos bem drenados, que favorecem o desenvolvimento rápido e de qualidade dessas árvores. A adaptabilidade do *Pinus* a diferentes tipos de solo, associada ao manejo florestal eficiente, permitiu a consolidação dessa região como um polo nacional de produção (IBÁ, 2024). A [Figura 6](#) traz um panorama da concentração das florestas plantadas com este gênero.

Figura 6 - Distribuição de área plantada de *Pinus* nas regiões Sul e Sudeste brasileira [hectares].



Fonte: Adaptado de CANOPY (2023).

A ampla disponibilidade de alguns gêneros cultivados no Brasil, como o *Pinus*, demonstra a capacidade subutilizada no setor da construção civil nacional. A adoção de projetos industrializados, que empregam madeira engenheirada, representa uma estratégia promissora para fomentar o uso desse recurso de origem renovável, promovendo a inovação tecnológica, a sustentabilidade ambiental e a eficiência produtiva no setor. No entanto, para viabilizar essa transformação, torna-se imprescindível a realização de investimentos consistentes em pesquisa e desenvolvimento, a consolidação de normas técnicas específicas. A superação de barreiras culturais mediante a conscientização da sociedade quanto à segurança, modernidade e desempenho estrutural da madeira engenheirada, configura-se como um fator determinante para sua ampla aceitação e consolidação como material de construção competitivo.

2.2.2 Indicadores das florestas nativas brasileiras

Com dimensões continentais, o Brasil é o abrigo de uma ampla quantidade de ecossistemas caracterizados por distintas formações vegetais nativas. O país possui 6 (seis) domínios Fitogeográficos (Veloso, Filho e Lima, 1991) distribuídos conforme a [Figura 7](#), entre eles a Floresta Amazônica (49,29% do território) destaca-se não apenas pela magnitude de sua

área, mas também por sua importância ecológica global, sendo que aproximadamente 60% de sua extensão total encontra-se dentro dos limites geográficos brasileiros. Além da Amazônia, o país possui outros biomas de grande relevância, como o Pantanal (1,76%) que é reconhecido como a maior planície inundável do planeta, também o Cerrado (23,92%), a Caatinga (9,92%), o Pampa (2,07%) e a Mata Atlântica (13,04%), cada um com características ecológicas singulares (Forzza, 2010). Em termos de biodiversidade, estima-se que cerca de 20% de todas as espécies vegetais e animais conhecidas no mundo estejam concentradas dentro do território brasileiro, o que insere o Brasil em um seleto grupo de nações classificadas como países “megadiversos”, em razão da riqueza e variedade de seus ecossistemas (MMA, 2022).

Figura 7 - Domínios fitogeográficos das florestas nativas brasileiras.



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010).

Em termos de espécies de árvores, a floresta amazônica abriga dezenas de milhares de espécies e um total estimado de 400 bilhões de exemplares. Quando consideramos todos os biomas juntos, o número mais conservador de espécies em território brasileiro é estimado em mais de 31 mil variedades, embora existam estudos que apontem até 45 mil espécies nativas em solo brasileiro. Apesar do Brasil possuir milhares de espécies arbóreas, ainda há a

necessidade de caracterizar um maior número de espécies adequadamente em termos de propriedades físicas e mecânicas (Forzza, 2010).

Um estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), analisou as propriedades físicas e mecânicas de 163 espécies de madeiras tropicais brasileiras, o que representa apenas uma pequena parte do total de espécies nativas existentes no país (Araújo, 2007). Além disso, as espécies de madeira exploradas comercialmente são poucas, sendo que existem muitas outras com potencial de uso ainda não estudadas (Brandão, 2010).

Com estimativas indicando a existência de 8.000 a 10.000 espécies arbóreas com potencial madeireiro no país (Belchior *et al.*, 2012), essa ausência de dados consolidados sobre o comportamento estrutural dessas madeiras representa um entrave para sua incorporação efetiva no setor da construção civil. A caracterização adequada das propriedades é imprescindível para subsidiar o desenvolvimento de normas técnicas, orientar o dimensionamento seguro de elementos estruturais e ampliar a confiabilidade do uso da madeira como material construtivo.

Apesar da notável riqueza botânica distribuída pelos seis domínios fitogeográficos brasileiros, o conhecimento técnico acerca das propriedades das madeiras nativas ainda é extremamente limitado. Estima-se que menos de 5% das espécies arbóreas brasileiras tenham suas propriedades físicas e mecânicas devidamente caracterizadas para aplicações na engenharia (Araújo, 2005; Brandão, 2010). Essa limitação evidencia uma lacuna significativa na literatura científica e no desenvolvimento tecnológico do setor florestal. Considerando a elevada diversidade de espécies presentes em biomas como a Floresta Amazônica, o Cerrado e a Mata Atlântica, a ampliação dos estudos de caracterização tecnológica torna-se essencial não apenas para o avanço da ciência dos materiais, mas também para a promoção do uso sustentável e estratégico dos recursos naturais brasileiros (Veloso, Filho e Lima, 1991).

Essa carência de informações técnicas reflete-se diretamente na realidade do mercado madeireiro nacional, que ainda concentra suas atividades em um número restrito de espécies tradicionalmente conhecidas e comercializadas. O potencial de inúmeras outras madeiras nativas, que podem apresentar propriedades mecânicas, resistência e durabilidade adequadas para diversas aplicações estruturais e industriais, permanece inexplorado. Em um cenário que demanda alternativas sustentáveis e a diversificação das fontes de recursos, a expansão do conhecimento sobre as madeiras brasileiras, especialmente aquelas cultivadas em florestas plantadas como o *Pinus*, desponta como estratégia fundamental para a abertura de novos mercados e a valorização da diversidade florestal do país.

2.3 PANORAMA GLOBAL DA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA

A adoção crescente da madeira engenheirada tem transformado a indústria da construção civil globalmente. Além de oferecer um desempenho térmico e acústico superior, esse material permite a construção rápida e limpa, com redução significativa dos resíduos de obra. Esta eficiência, somada ao menor impacto ambiental em comparação aos materiais convencionais, posiciona a madeira engenheirada como protagonista na construção civil sustentável do século XXI (Scoczynski *et al.*, 2024).

O surgimento de novas tecnologias de fabricação e união de elementos de madeira, como a madeira lamelada colada cruzada (MLCC/CLT), tem ampliado as possibilidades arquitetônicas e estruturais. Além disso, estudos apontam que estruturas de madeira possuem excelente comportamento ao fogo, desde que projetadas com a devida proteção, evidenciando sua segurança e viabilidade para edificações de múltiplos andares.

A madeira engenheirada tem sido empregada com sucesso em projetos arquitetônicos de grande escala, como o *Centre Pompidou-Metz*, na França, e o Aeroporto de Oslo, na Noruega. Essas construções são notórios exemplos de como o material pode ser utilizado como elemento estrutural e como recurso estético e simbólico. As estruturas em madeira proporcionam espaços modernos, com menor impacto ambiental e grande durabilidade.

Estes projetos também evidenciam a versatilidade da madeira engenheirada em diferentes climas e contextos culturais, consolidando sua posição como alternativa viável à construção tradicional. O uso de sistemas modulares e pré-fabricados tem permitido maior controle de qualidade, eficiência logística e redução de custos operacionais, aspectos essenciais para a expansão dessa tecnologia.

Localizado em Sevilha na Espanha, o *Metropol Parasol* (Figura 8) é considerado uma das maiores estruturas de madeira do mundo. Construído com painéis de madeira lamelada, o projeto é um exemplo marcante de como a madeira engenheirada pode ser utilizada em obras de escala monumental. Sua forma orgânica e sua localização central redefiniram a paisagem urbana da cidade, transformando-se em ícone arquitetônico e ponto turístico.

A obra combina inovação estrutural e eficiência ambiental, promovendo sombreamento urbano e interação social em seu entorno. Seu sucesso está associado à utilização de tecnologia de ponta na fabricação dos elementos estruturais, bem como à integração entre arquitetura contemporânea e tradição local.

Figura 8 - Obra em madeira lamelada colada (MLC) Metropol Parasol.



Fonte: <https://panoramadeviagem.com.br/metropol-parasol-setas-sevilha/>
Acessado em 29/04/2025 às 12:50h

Com 85,4 metros de altura e 18 andares, o *Mjøstårnet* (Figura 9) é um dos edifícios de madeira mais altos do mundo. Situado em Brumunddal na Noruega, é um marco da engenharia estrutural em madeira lamelada colada (MLC/GLT) e madeira lamelada colada cruzada (MLCC/CLT). Sua construção demonstra que é possível conciliar altura, segurança e sustentabilidade, mesmo em projetos de uso múltiplo, como escritórios, hotel e piscina.

O edifício comprova a viabilidade da madeira engenheirada como alternativa aos sistemas construtivos convencionais, inclusive em ambientes de clima rigoroso. Seu desempenho estrutural e energético é complementado por uma cadeia produtiva local eficiente e certificada, reforçando o compromisso da obra com a sustentabilidade ambiental.

Figura 9 - Edifício Mjøstårnet construído com madeira engenheirada.



Fonte: <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter/>
Acessado em 29/04/2025 às 14h

Além dos aspectos estruturais, o *Mjøstårnet* também se destaca por atender às rigorosas exigências de segurança contra incêndio, fundamentais em edificações de grande altura. O projeto incorporou soluções avançadas de proteção passiva, como seções estruturais superdimensionadas para permitir a formação de camadas carbonizadas que retardam a

propagação do fogo, além de sistemas de *sprinklers* e compartimentação eficiente dos ambientes.

O *Centre Pompidou-Metz* (Figura 10) na França, apresenta uma coberta de madeira engenheirada inspirada em técnicas de tecelagem tradicional chinesa. A estrutura utiliza madeira lamelada colada (MLC) com alta precisão geométrica, permitindo grandes vãos e formas fluídas, que proporcionam uma experiência arquitetônica inovadora.

Essa obra destaca-se pela integração entre tecnologia e expressividade formal, consolidando a madeira como material de alto valor arquitetônico. O projeto também simboliza o comprometimento com a redução das emissões de carbono e o uso racional dos recursos naturais, sem comprometer a criatividade e a funcionalidade.

Figura 10 - Centre Pompidou-Metz localizado na França.

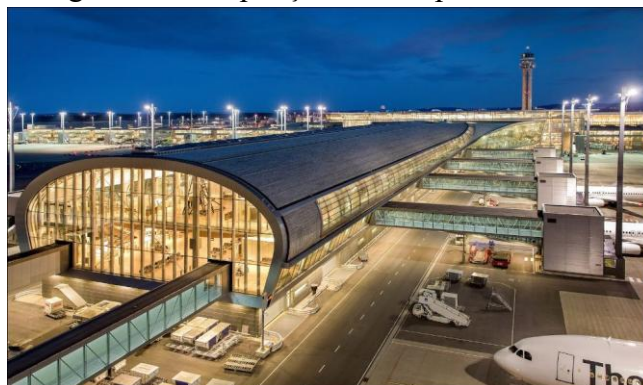


Fonte: <https://www.explore-grandest.com/en/offerings/activities/city-adventures/a-day-at-the-centre-pompidou-metz/>

Acessado em 29/04/2025 às 13:11h

A ampliação do Aeroporto *Gardermoen* em Oslo (Figura 11) utilizou madeira engenheirada como elemento central na estrutura do terminal. A utilização de madeira lamelada colada (MLC/GLT) no terminal proporciona um ambiente moderno aos usuários, além de reduzir significativamente a pegada de carbono da obra. A combinação de desempenho técnico, estética e sustentabilidade posiciona o aeroporto como exemplo de inovação em infraestrutura pública. A solução estrutural adotada integrou sistemas híbridos e conexões de alta performance, garantindo resistência ao fogo, estabilidade sob cargas dinâmicas e excelente comportamento termoacústico. Essa obra evidencia que, quando apoiada por tecnologia avançada, planejamento integrado e políticas públicas alinhadas à construção sustentável, a madeira engenheirada se torna não apenas uma alternativa viável, mas uma protagonista em infraestruturas complexas, inspirando novos paradigmas para aeroportos, estações de transporte e edificações públicas de grande porte ao redor do mundo.

Figura 11 - Ampliação do aeroporto de Oslo.



Fonte: <https://eficienciaenergtica.blogspot.com/2017/05/novo-terminal-no-aeroporto-de-oslo.html>
Acessado em 29/04/2025 às 13:20h

2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO GÊNERO *PINUS*

2.4.1 Aspectos anatômicos e fatores que afetam as propriedades da madeira de *Pinus*

2.4.1.1 Classificação como madeira conífera (resinosas)

A madeira do gênero *Pinus* é classificada como conífera ou resinosa, e pertencente ao grupo das gimnospermas. Essa classificação botânica se dá pela inexistência de flores e frutos verdadeiros e pela presença de sementes expostas, geralmente agrupadas em cones (De Oliveira *et al.*, 2006). As coníferas são importantes espécies florestais de interesse econômico, especialmente nas regiões temperadas e subtropicais, onde essa espécie tem maior facilidade de adaptação e apresenta rápido crescimento.

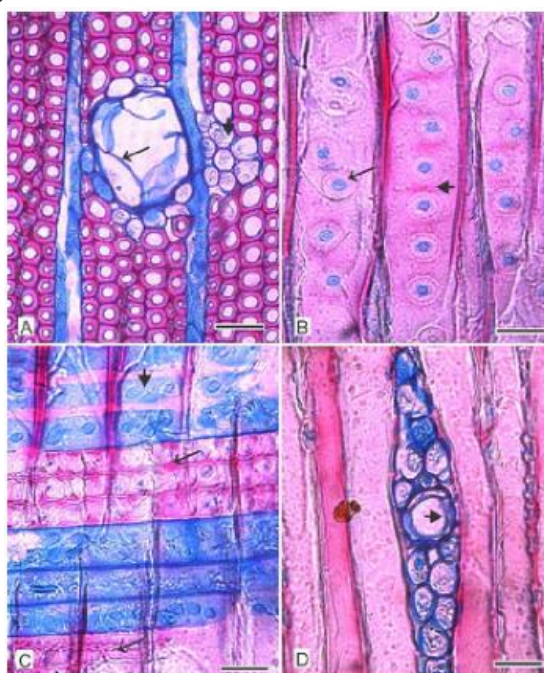
As gimnospermas, diferentemente das angiospermas, também denominadas por folhosas, possuem uma estrutura anatômica simplificada (Figura 12), formadas predominantemente por traqueídeos que são células alongadas que desempenham ambas as funções de condução e suporte mecânico (Moreschi, 2005). Essa simplicidade anatômica confere às madeiras do grupo das coníferas um aspecto mais homogêneo e isotrópico em comparação às folhosas, o que as torna especialmente interessante ao processamento industrial e para utilização em componentes estruturais padronizados (IBÁ, 2019).

Devido a presença de canais resiníferos, as espécies desse grupo também recebem a classificação de resinosas que são estruturas tubulares especializadas em armazenar e transportar resinas. Essas substâncias desempenham papel de proteção contra-ataques de insetos, fungos e agentes bióticos, além de conferir ao material propriedades específicas como odor característico e comportamento diferenciado sob ação de calor (Vázquez-González *et al.*,

2020). A presença de resina pode afetar o desempenho da madeira em aplicações específicas como colagens ou acabamento superficial.

O *Pinus elliottii*, por exemplo, apresenta propriedades mecânicas compatíveis com utilizações estruturais na construção civil. O uso de madeiras coníferas é particularmente interessante devido à facilidade de obtenção, uniformidade de propriedades em um grau maior e alta relação resistência/peso. Essas características são diretamente influenciadas pela classificação botânica e anatômica da madeira, que determina o padrão de crescimento, a organização celular e o comportamento sob carga (Moraes Neto, 2009). A menor variabilidade intrínseca observada nessas espécies permite maior confiabilidade na estimativa de suas propriedades mecânicas, favorecendo análises estruturais mais consistentes e a aplicação de modelos de dimensionamento com níveis adequados de segurança.

Figura 12 - Estrutura anatômica do *Pinus elliottii*.



Fonte: Siegloch e Marchiori (2015).

Nota: Fotomicrografias do lenho de *Pinus elliottii*. A - Seção transversal. B,C - Seção radial. D - Seção tangencial. A - Lenho tardio com parênquima axial (seta curta) em torno do canal resinífero longitudinal, e células epiteliais finas (seta longa). B - Pontoações traqueoidais areoladas unisseriadas, com torus em forma de disco (seta longa), e crássulas (seta curta). C - Campo de cruzamento com pontoações pinóides (seta curta) e traqueóides radiais com paredes dentadas (setas longas). D - Raio fusiforme, e canal resinífero com células epiteliais de paredes finas (seta curta). Escala das barras: A = 100 µm; B,C,D = 50 µm.

Do ponto de vista silvicultural, as coníferas apresentam rápido crescimento e alta produtividade, fatores que impulsionaram seu cultivo em larga escala em países como Brasil, Chile, Estados Unidos e Nova Zelândia (FAO, 2020). No Brasil, as espécies de *Pinus* são

destinadas para a produção de madeira para fins industriais, destacando-se o *Pinus elliotti* e *Pinus taeda*, como principais espécies utilizadas.

As coníferas, por possuírem células mais longas e menos complexas e serem resinosas, tendem a apresentar menor tendência ao colapso durante a secagem e maior estabilidade dimensional, de forma contrária às folhosas (Vidaurre *et al.*, 2013). Essa característica é especialmente útil ao processamento industrial e contribui para a eficiência na fabricação de peças estruturais, como vigas e painéis laminados.

Quanto a espécie, as práticas de plantio e de manejo influenciam diretamente o comportamento da madeira de *Pinus*. Apesar de ser comumente classificada como coníferas, há distinções importantes entre interespecies em relação à presença e distribuição de canais resiníferos, espessura da parede celular e proporção de madeira juvenil, fatores que afetam a densidade e a resistência mecânica (Missio *et al.*, 2015). Assim, a classificação botânica deve ser complementada por análises anatômicas e físicas para fins técnicos.

A presença de resina é um protetor natural para a madeira, porém pode apresentar desafios em algumas etapas dos processos industriais, como colagem e usinagem. Em temperaturas elevadas ou ambientes úmidos comprometer a fixação dos adesivos e acabamentos superficiais, havendo necessidade de adotar tratamentos específicos para aplicações exigentes (Faria, Magalhães e Matos, 2017). Ainda assim, é possível com as técnicas existentes utilizar as madeiras advindas das coníferas de forma segura, desde que haja controle de qualidade.

A classificação do *Pinus* como madeira conífera resinosa fundamenta a compreensão quanto ao seu desempenho em diferentes aplicações. Essa categorização botânica define a estrutura anatômica básica da espécie, que condiciona todo o ciclo produtivo, desde o manejo florestal e os processos de beneficiamento até o comportamento final do material em serviço. Em projetos estruturais, essa classificação permite antecipar o comportamento da madeira em relação as cargas, umidade e temperatura, norteando o dimensionamento e a especificação de produtos engenheirados.

2.4.1.2 Implicações anatômicas no desempenho físico-mecânico

A anatomia da madeira de *Pinus* exerce influência significativa em suas propriedades físico-mecânicas, determinando seu desempenho em aplicações estruturais e industriais. Os principais elementos anatômicos que afetam essas propriedades incluem os traqueídeos, os canais resiníferos e a disposição das fibras.

Os traqueídeos são células alongadas que compõem a maior parte do xilema nas coníferas, como o *Pinus*. Desempenham um papel crucial na condução de água e no suporte estrutural da madeira. A densidade e a espessura das paredes dos traqueídeos influenciam diretamente a resistência mecânica da madeira.

Os canais resiníferos são estruturas tubulares presentes na madeira de *Pinus*, responsáveis pela produção e armazenamento de resina. A presença e a distribuição desses canais influenciam a durabilidade natural da madeira, conferindo resistência a ataques de insetos e fungos. Além disso, a densidade dos canais resiníferos pode afetar a permeabilidade da madeira, impactando processos como a secagem e o tratamento preservativo (Leggate *et al.*, 2020).

A orientação das fibras na madeira de *Pinus* contribui para sua anisotropia, ou seja, a variação das propriedades mecânicas em diferentes direções. Essa característica é fundamental para o comportamento da madeira sob cargas mecânicas, influenciando sua resistência à flexão, tração e compressão. A disposição uniforme das fibras pode melhorar a estabilidade dimensional e a resistência mecânica da madeira (Klock e Andrade, 2013).

2.4.1.3 Influências determinísticas dos anéis de crescimento nas propriedades da madeira de *Pinus*

Os anéis de crescimento na madeira de *Pinus* refletem as condições ambientais durante o desenvolvimento da árvore. A proporção entre lenho inicial e lenho tardio dentro desses anéis afeta diretamente as propriedades mecânicas da madeira. Estudos demonstram que uma maior proporção de lenho tardio está associada a uma maior densidade e resistência mecânica, tornando a madeira mais adequada para aplicações estruturais (Mayard *et al.*, 2022).

A idade da árvore de *Pinus* influencia significativamente a qualidade da madeira produzida. Madeiras provenientes de árvores mais jovens tendem a apresentar menor densidade e resistência mecânica, enquanto aquelas de árvores mais maduras possuem características superiores para usos estruturais. A seleção da idade de corte adequada é, portanto, crucial para garantir a obtenção de madeira com propriedades físico-mecânicas desejáveis.

Diferentes espécies de *Pinus* apresentam variações anatômicas que impactam suas propriedades mecânicas. Por exemplo, estudos comparativos entre *Pinus sylvestris* e suas variedades revelam diferenças na densidade dos traqueídeos e na presença de canais resiníferos, resultando em variações na resistência mecânica e na durabilidade da madeira (Yarnan, 2007).

A densidade da madeira de *Pinus* é um dos principais indicadores de suas propriedades mecânicas. Madeiras com maior densidade geralmente apresentam maior resistência à compressão, tração e flexão. A densidade está diretamente relacionada à estrutura anatômica da madeira, incluindo a espessura das paredes celulares e a proporção de lenho tardio (Mayard *et al.*, 2022).

A anatomia da madeira de *Pinus* também afeta sua trabalhabilidade, ou seja, a facilidade com que pode ser processada para diferentes usos. Características como a uniformidade das fibras e a presença de canais resiníferos influenciam processos como o corte, a secagem e o acabamento da madeira. Madeiras com estrutura anatômica homogênea tendem a ser mais fáceis de trabalhar e apresentam melhor qualidade final (Klock e Andrade, 2013).

As propriedades anatômicas da madeira de *Pinus* têm implicações diretas na fabricação de peças engenheiradas, como vigas lameladas e painéis estruturais. A uniformidade anatômica e a presença de características desejáveis, como alta densidade e resistência mecânica, são essenciais para garantir o desempenho e a segurança dessas estruturas. A seleção adequada da madeira com base em suas características anatômicas é, portanto, fundamental nesse contexto.

Em resumo, a anatomia da madeira de *Pinus* desempenha um papel crucial na determinação de suas propriedades físico-mecânicas. A compreensão detalhada dos elementos anatômicos, como traqueídeos, canais resiníferos e disposição das fibras, é essencial para a seleção e o uso adequado da madeira em diversas aplicações. Investimentos em pesquisas anatômicas e na caracterização da madeira de *Pinus* contribuem para o aprimoramento de suas aplicações industriais e estruturais.

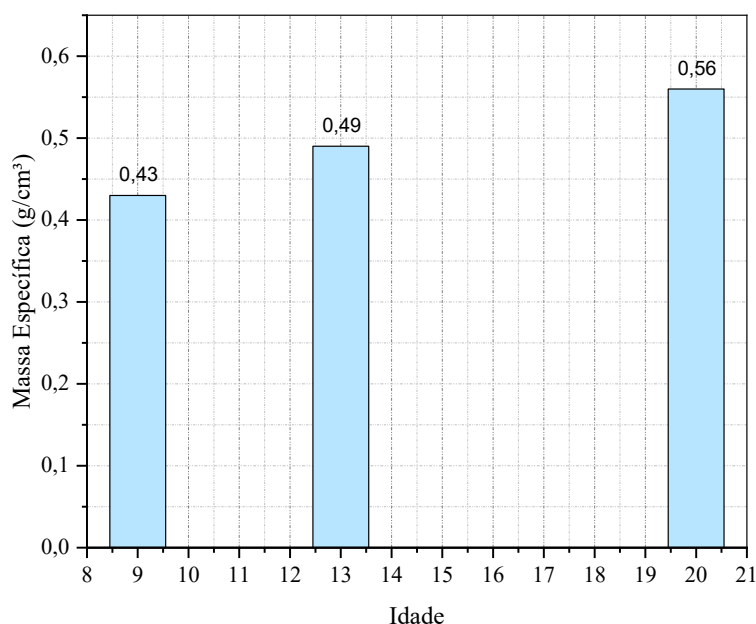
2.4.1.4 Importância do controle da idade de corte para uso estrutural

O controle da idade de corte das árvores de *Pinus* é um fator determinante para a qualidade da madeira destinada a aplicações estruturais, especialmente na produção de peças engenheiradas. Estudos demonstram que árvores colhidas com 20 anos apresentam madeira com propriedades físico-mecânicas superiores em comparação àquelas colhidas aos 9 anos (Figura 13). A madeira de árvores mais velhas possui maior densidade, dimensões superiores de traqueídeos e melhor resultado de resistência à flexão e resistência a compressão paralela as fibras (Oliveira *et al.*, 2006). Essas características são essenciais para a fabricação de elementos estruturais que exigem alta resistência e rigidez, como vigas e painéis laminados colados (Vivian *et al.*, 2022).

A transição da madeira juvenil para a adulta em *Pinus taeda* ocorre entre os 11 e 17 anos de idade. No entanto, mesmo em árvores com 30 anos, a proporção de madeira juvenil pode ser significativa, representando até 60-80% da seção transversal do tronco (Vivian *et al.*, 2022). Isso indica que, para obter uma maior proporção de madeira adulta, com propriedades desejáveis para usos estruturais, é necessário considerar ciclos de produção ainda mais longos e estratégias de manejo adequadas (Leng *et al.*, 2024). A madeira adulta apresenta maior estabilidade dimensional e menor anisotropia, características importantes para a durabilidade e desempenho de peças engenheiradas em ambientes diversos (Moraes Neto *et al.*, 2009).

Além das vantagens técnicas, ciclos de produção mais longos podem ser economicamente viáveis. A madeira de maior qualidade obtida de árvores mais velhas pode alcançar preços superiores no mercado, compensando o tempo adicional de crescimento. Para atender a mercados que demandam madeira de alta performance, como o da construção civil, é fundamental alinhar práticas de manejo florestal que priorizem a produção de madeira adulta. Isso inclui o planejamento do espaçamento entre árvores, desbastes seletivos e a definição estratégica da idade de corte, visando otimizar a qualidade da matéria-prima para aplicações estruturais (Vivian *et al.*, 2022).

Figura 13 - Massa específica da madeira *Pinus taeda* em função da idade.



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2006).

Outro ponto favorável é a crescente adoção de tecnologias de caracterização não destrutiva, como ultrassom e análise de imagens, que permite avaliar com maior precisão as

propriedades da madeira em diferentes idades e regiões do tronco, contribuindo para decisões mais assertivas quanto ao momento ideal de colheita e à destinação do material. Avanços tecnológicos aliados a práticas de manejo florestal orientadas para a produção de madeira adulta, reforçam o potencial deste compósito natural como fonte sustentável de matéria-prima.

2.4.1.5 Consequências no módulo de elasticidade e resistência à flexão

O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura na resistência à flexão (MOR) são propriedades mecânicas fundamentais para a aplicação estrutural da madeira de *Pinus*, especialmente na fabricação de elementos engenheirados como vigas lameladas coladas (MLC/GLT) e painéis de madeira lamelada cruzada (MLCC/CLT). A rigidez e a capacidade de carga das estruturas de madeira baseiam-se nessas propriedades, que influenciam diretamente a segurança e durabilidade das peças estruturantes (Mustefaga *et al.*, 2024).

A idade da árvore e a proporção de madeira juvenil e adulta afetam o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura. A madeira juvenil, proveniente de árvores jovens ou de regiões centrais do tronco, apresenta menor densidade e, conseqüentemente, menores valores de módulo de elasticidade. Por outro lado, a madeira adulta encontrada em árvores com maior idade ou nas regiões externas do tronco, possui maior densidade e melhores propriedades mecânicas. A leitura dessas variantes é importante para o entendimento na seleção da madeira para aplicações estruturais exigentes (Ballarin e Palma, 2003).

Além da idade da árvore, fatores anatômicos como a proporção de lenho tardio e a orientação das fibras, também influenciam o módulo de elasticidade. O lenho tardio, formado no final da estação de crescimento, é mais denso e contribui para uma maior rigidez e resistência da madeira. A orientação das fibras, quando alinhadas paralelamente ao eixo da peça, também favorece melhores propriedades mecânicas (Mańkowski, Karwat e Laskowska, 2025).

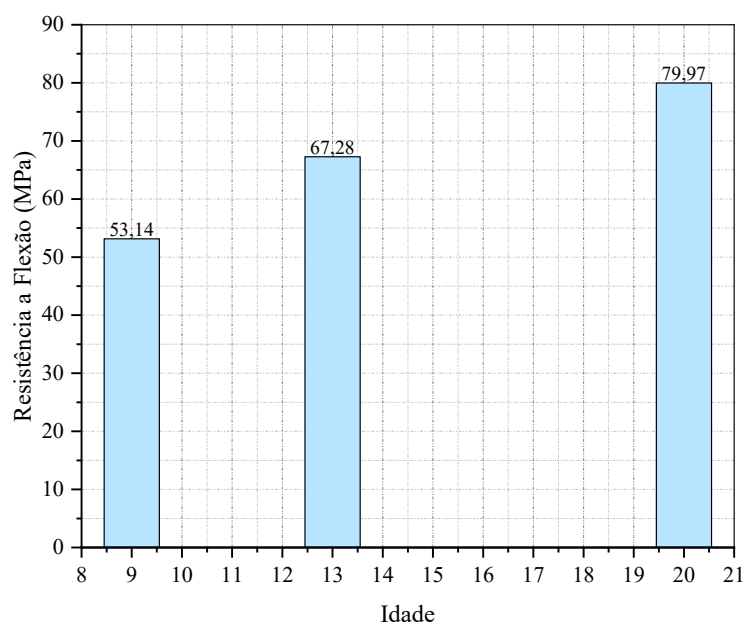
Não obstante, a presença de defeitos como nós e a inclinação dos anéis de crescimento, também contribuem na redução do módulo de elasticidade da madeira de *Pinus*. Esses defeitos atuam como pontos de concentração de tensões, diminuindo a capacidade de carga e a rigidez das peças estruturais. Uma classificação visual e mecânica que atenda as padronizações normativas da madeira é essencial para garantir a qualidade e a segurança das estruturas construídas com esse material (Grant, Anton e Lind, 1984).

A utilização de técnicas não destrutivas, como o ultrassom e a vibração longitudinal, tem se mostrado eficaz na avaliação do MOE e do MOR da madeira de *Pinus*. Essas técnicas permitem a seleção de peças com propriedades mecânicas adequadas sem a necessidade de

testes destrutivos, otimizando o processo de produção de elementos estruturais e reduzindo desperdícios (Ballarin e Nogueira, 2005).

Na fabricação de elementos engenheirados, como o CLT, a uniformidade do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura entre as lâminas é crucial para garantir o desempenho estrutural do painel. A seleção criteriosa das lâminas, considerando suas propriedades mecânicas, é fundamental para a produção de painéis com alta rigidez e capacidade de carga. Além disso, o controle da umidade e a qualidade da colagem entre as lâminas também influenciam o desempenho final do produto (Terezo *et al.*, 2023).

Figura 14 - Resistência a flexão do *Pinus taeda* em função da idade



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, (2006).

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus*, especialmente o módulo de elasticidade e a resistência à flexão se torna essencial para sua aplicação em estruturas de engenharia. Fatores como a idade da árvore, a proporção de madeira juvenil e adulta, a presença de defeitos e a uniformidade das propriedades entre as peças devem ser cuidadosamente considerados no manejo florestal, no processamento e na fabricação de elementos estruturais para garantir a segurança e a eficiência das construções em madeira.

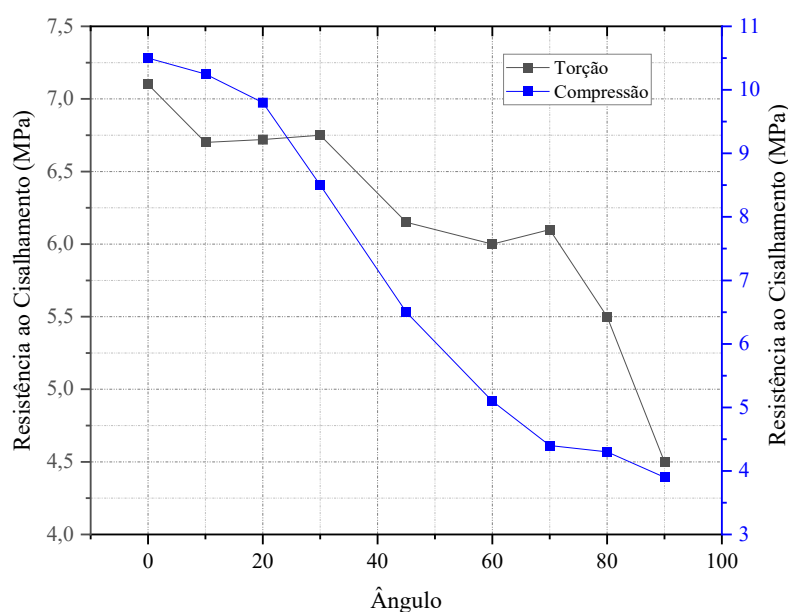
2.4.1.6 Comportamento ao cisalhamento e compressão

Em termos de madeiras engenheiradas, a utilização de adesivos adequados na colagem de elementos de madeira deve garantir a resistência ao cisalhamento das juntas (Mello *et al.*,

2025). Estudos apontam que adesivos têm mostrado bom desempenho em aplicações estruturais, proporcionando resistência adequada ao cisalhamento mesmo em condições de variação de umidade e temperatura (Padilha *et al.*, 2023).

A resistência ao cisalhamento de juntas coladas de *Pinus ssp.* com diferentes ângulos entre fibras, unidas com adesivo poliuretano bicomponente, indicam que a resistência média ao cisalhamento varia conforme o ângulo de colagem (Figura 15), sendo maior em ângulos próximos a 0° e diminuindo à medida que o ângulo aumenta (Padilha *et al.*, 2023).

Figura 15 - Resistência média ao cisalhamento em relação ao ângulo de colagem.



Fonte: Adaptado de Padilha *et al.*, (2023).

A resistência à compressão paralela às fibras é uma propriedade crítica para elementos estruturais. Um estudo com a madeira de *Pinus patula* cultivada por 14 anos, apresentou resistência média à compressão paralela à grã de 21,12 MPa e de 51,85 MPa para o módulo de ruptura na flexão estática quando submetida a testes laboratoriais (Tabela 3). O dimensionamento de elementos estruturais depende dessas propriedades (Modes *et al.*, 2021b).

Pela dialética, madeiras com maior densidade apresentam maior resistência ao cisalhamento e compressão. Entretanto, a densidade varia dentro da mesma espécie, causadas por fatores como idade da árvore, localização geográfica e práticas silviculturais. Árvores de *Pinus taeda* cultivadas em espaçamentos mais amplos apresentaram menor densidade (Tabela 4), afetando suas propriedades mecânicas (Garbachevski *et al.*, 2022; Mello *et al.*, 2025).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do *Pinus patula*.

	MEA ³ 12%	Flexão estática		Compressão paralela	Cisalhamento
	Kg/m ³	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Resistência (MPa)	
Máximo	786	13.465,81	84,14	35,01	10,56
Mínimo	248	3.242,59	24,28	10,86	2,80
Médio	425	8.404,98	51,85	21,12	5,90
DP¹	139,29	3.013,88	17,83	6,91	1,93
CV (%)²	32,74	35,85	34,39	32,73	32,70

Fonte: Adaptado de Modes *et al.* (2021b).Nota: ¹ Desvio padrão; ² Coeficiente de variação; ³ Massa Específica Aparente a 12% de umidade.Tabela 4 - Média para as propriedades físicas e mecânicas para madeira de *Pinus taeda*.

Fator	Nível	ρ_{ap} ¹ (g/cm ³)	LWP ² (%)	RPI ³	MOR (MPa)	MOE (MPa)	f_{c0} ⁴ (MPa)	E_{c0} ⁵ (MPa)	f_{v0} ⁶ (MPa)
Idade (anos)	13	0,46	23,37	1,78	41,45	4183	28,88	6.310	9,11
	15	0,47	26,16	2,28	58,78	5383	36,72	6.855	10,02
Espaçamento (metros)	2,0x2,0	0,46	25,75	2,27	52,39	5048	31,87	7.982	9,96
	3,0x2,0	0,49	25,34	1,94	50,52	4696	35,26	5.607	9,48
	4,0x2,0	0,45	23,21	1,88	47,41	4605	31,26	6.159	9,27
CV(%)⁷		13,63	30,16	34,73	27,86	33,53	21,26	37,69	18,80

Fonte: Adaptado de Garbachevski *et al.* (2022).Nota: ¹ Densidade aparente; ² Porcentagem de lenho tardio; ³ Número de anéis por polegada; ⁴ Resistência a compressão paralela; ⁵ Módulo de elasticidade na compressão; ⁶ Resistência ao cisalhamento; ⁷ Coeficiente de variação.

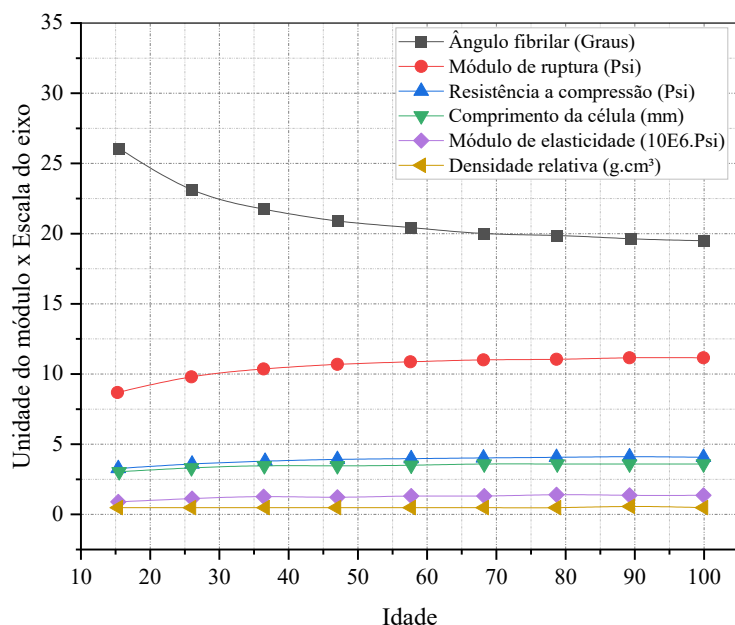
Estudos das propriedades anatômicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda* entre 20 e 100 anos de idade mostrou variações significativas ao longo dos anéis de crescimento da árvore (Figura 16). Nos primeiros anos, observa-se uma maior variabilidade no desempenho mecânico, o que é atribuído à presença de células com paredes mais finas e ângulo microfibrilar elevado, características que comprometem a rigidez e a resistência da madeira. Essas variações são determinantes para sua adequação em aplicações estruturais, nas quais a uniformidade e o desempenho previsível são essenciais (Bendtsen e Senft, 1986).

A orientação das fibras também desempenha um papel crucial no comportamento ao cisalhamento e compressão. Madeiras com fibras alinhadas paralelamente ao eixo da peça apresentam maior resistência mecânica. Desvios na orientação das fibras, como inclinação dos anéis de crescimento, podem reduzir significativamente a resistência ao cisalhamento e compressão, comprometendo a integridade estrutural dos elementos de madeira.

Logo, o comportamento ao cisalhamento e compressão da madeira de *Pinus* é influenciado por diversos fatores e compreensão desses fatores é essencial para o uso seguro e eficiente da madeira em aplicações estruturais. Para tanto, ensaios laboratoriais são essenciais

para a determinação das propriedades mecânicas da madeira fornecendo dados essenciais para o dimensionamento e a segurança das estruturas de madeira.

Figura 16 - Propriedades do *Pinus taeda* com idades entre 20 e 100 anos.



Fonte: Adaptado de Bendtsen e Senft (1986).

2.4.1.7 Crescimento rápido e implicações estruturais

Embora o crescimento rápido de espécies de *Pinus* seja vantajoso em termos de produtividade, é importante considerar suas implicações estruturais. A adoção de práticas silviculturais adequadas, controle da idade de corte e, quando necessário, aplicação de técnicas de modificação da madeira são estratégias fundamentais para garantir a qualidade e segurança das estruturas construídas com madeira de crescimento rápido.

Porém, esse crescimento rápido pode impactar negativamente as propriedades estruturais da madeira. Árvores de crescimento acelerado tendem a apresentar maior proporção de madeira juvenil, que possui menor densidade e resistência mecânica em comparação à madeira adulta. Essa diferença é atribuída à estrutura celular menos desenvolvida da madeira juvenil, resultando em menor rigidez e resistência à compressão e flexão (Ballarin e Palma, 2003).

Além disso, a variabilidade das propriedades mecânicas dentro de uma mesma árvore aumenta com o crescimento rápido. Isso se deve à formação desigual de tecidos lenhosos ao longo do tronco, resultando em regiões com diferentes capacidades de suporte de carga. Essa

heterogeneidade pode comprometer a uniformidade e previsibilidade do desempenho estrutural da madeira, exigindo cuidados adicionais na seleção e classificação das peças para uso em construções (Latorraca e Albuquerque, 2000).

Como a madeira juvenil possui características anatômicas e físicas distintas, como menor densidade e maior microfibrilação, seu predomínio pode reduzir a qualidade estrutural da madeira. Portanto, o controle da idade de corte é fundamental para garantir uma maior proporção de madeira adulta, com melhores propriedades mecânicas.

Para mitigar os efeitos negativos do crescimento rápido, técnicas de modificação da madeira, como a densificação termomecânica, têm sido estudadas. Esses processos visam aumentar a densidade e melhorar as propriedades mecânicas da madeira de crescimento rápido, tornando-a mais adequada para aplicações estruturais. Por exemplo, tratamentos térmicos controlados podem aumentar a rigidez e a resistência da madeira, compensando as deficiências inerentes à madeira juvenil (Pertuzzatti *et al.*, 2018).

2.4.2 Propriedades físicas do *Pinus*

As propriedades físicas da madeira de *Pinus* influenciam seu desempenho estrutural, comportamento higroscópico, retrátil e térmico. Essas características estão diretamente relacionadas à sua estrutura anatômica, origem, idade e condições ambientais de crescimento. A seguir, é realizada uma abordagem sobre as principais propriedades físicas da madeira de *Pinus*, conforme trabalhos experimentais estudados na literatura e normas técnicas pertinentes.

2.4.2.1 Densidade

A densidade da madeira de *Pinus* é considerada moderada entre as espécies de coníferas. Nas interespecies do *Pinus*, são encontradas densidades médias entre 422,0 kg/m³ e 525,0 kg/m³ para peças com umidade em torno de 12%. A densidade influencia diretamente a resistência mecânica e a taxa de carbonização, sendo um dos principais parâmetros para dimensionamento em situações de incêndio.

Inquestionavelmente a densidade é uma das propriedades físicas mais relevantes da madeira, pois além da relação direta com a resistência mecânica, também influencia nas propriedades de durabilidade e no comportamento ao fogo. Segundo a NBR 7190:2022, a densidade aparente da madeira deve ser determinada com base no volume a 12% de umidade, sendo a condicionante de equilíbrio higroscópico em ambientes internos. A norma estabelece

procedimentos laboratoriais padronizados para a obtenção dessa propriedade, especialmente para uso estrutural.

Em complemento a regulamentação brasileira, a norma ASTM D2395-17 classifica a densidade da madeira em dois métodos principais: o método A, que usa a massa seca ao forno e o volume verde; e o método B, que utiliza a massa e o volume ambos ao teor de umidade de ensaio (geralmente 12%). Esta norma é amplamente aplicada na caracterização de madeiras nos Estados Unidos, e suas diretrizes são utilizadas para comparação entre estudos internacionais. A densidade do *Pinus elliottii*, uma das espécies mais utilizadas no Brasil, apresenta valores médios entre 450 e 600 kg/m³ a 12% de umidade, segundo estudos experimentais (Pires *et al.*, 2004).

Já a norma europeia EN 384:2016, especifica valores característicos de propriedades físicas e mecânicas da madeira serrada com base em classificação visual e mecânica. Para o gênero *Pinus*, especialmente a espécie *Pinus sylvestris*, a densidade característica varia entre 350 e 500 kg/m³, dependendo da classe de resistência. A norma também determina procedimentos para amostragem e tratamento estatístico, garantindo maior confiabilidade aos valores utilizados em projeto estrutural.

Além dos aspectos normativos, também há influência regional e ambiental sobre a densidade da madeira de *Pinus*, uma vez que fatores como clima, tipo de solo, práticas silviculturais e idade de corte podem gerar variações significativas nos valores medidos. Tais diferenças impactam diretamente o desempenho estrutural, sobretudo em aplicações que exigem alta confiabilidade, como elementos expostos ao fogo ou sujeitos a grandes esforços mecânicos.

Além da variação interespecies, a densidade também pode apresentar flutuações dentro de uma mesma árvore, variando com a altura e o diâmetro do tronco. Isso se deve à presença de lenho juvenil e adulto, bem como à quantidade de alburno e cerne. Essa variabilidade requer a adoção de amostragens representativas na caracterização tecnológica da madeira, conforme preconizado na NBR 7190:2022, item 6.2.1.

A densidade influencia diretamente o comportamento da madeira frente ao fogo, sendo que madeiras de maior densidade tendem a apresentar menor taxa de carbonização superficial. Portanto, no contexto de desempenho ao fogo de estruturas de madeira, como vigas reforçadas com aço, a densidade torna-se um parâmetro fundamental para análise e modelagem numérica em softwares de elementos finitos (Figueroa, 2005).

Tabela 5 - Valores médios de densidade a 12% de umidade e densidade básica de *Pinus elliottii*, obtidos por três métodos de determinação de densidade.

Idade (Anos)	Unidade da Amostra	Medidas de densidades (g/cm ³)		
		Métodos		
		Imersão	Medição Direta	Radiação Gama
8	12%	0,479	0,455	0,467
	Básica	0,389	0,376	0,385
15	12%	0,579	0,553	0,554
	Básica	0,472	0,451	0,451
25	12%	0,594	0,576	0,582
	Básica	0,481	0,468	0,472
35	12%	0,634	0,634	0,616
	Básica	0,519	0,510	0,498

Fonte: Adaptado de Pires *et al.* (2004).

Outro ponto importante é que a densidade é usada como base para estimativas de outras propriedades, como resistência à compressão, tração e flexão, além de ser parâmetro de entrada em modelos computacionais de análise estrutural. A norma brasileira permite a correlação dessas propriedades com a densidade, o que pode ser vantajoso na ausência de dados experimentais específicos, conforme previsto no Anexo E da NBR 7190:2022.

Vale destacar que a correta determinação da densidade é essencial para fins de classificação da madeira, tanto visual quanto mecânica. A norma EN 14081-1 complementa essa abordagem ao tratar da classificação de madeiras estruturais na Europa, considerando a densidade como uma das variáveis mais importantes para definir a classe de resistência de peças comerciais de *Pinus*.

2.4.2.2 Teor de umidade

O teor de umidade é uma das propriedades físicas mais sensíveis e determinantes do comportamento da madeira, pois afeta significativamente as demais propriedades físicas, mecânicas e térmicas. O teor de umidade da madeira é definido como a relação entre a massa de água presente nos poros e cavidades da madeira e a massa seca, e de forma geral expresso em porcentagem. A NBR 7190:2022 determina o teor de umidade de referência de 12% como condição padrão para caracterização das propriedades físicas e mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas, pois esse é o equilíbrio higroscópico comum em ambientes internos em clima tropical.

Conforme a ASTM D4442-20, que trata da determinação do teor de umidade da madeira e produtos derivados, existem dois métodos principais para essa medição: o método da estufa (gravimétrico) e o método elétrico (condutividade elétrica ou capacitância). O método gravimétrico, também descrito na NBR 7190:2022, é considerado padrão por apresentar maior precisão. Este método consiste em secar a amostra a 103 ± 2 °C até massa constante e calcular a umidade pela diferença entre a massa inicial e a massa seca.

A umidade da madeira *Pinus* pode variar significativamente conforme a etapa de beneficiamento e o ambiente de estocagem. Amostras recém-cortadas podem apresentar teores superiores a 100%, pois a massa de água contida supera a massa seca da madeira. Em contrapartida, após o tratamento e secagem industrial, os valores podem ser ajustados para o nível ideal de 12% para uso em construções e aplicações estruturais. Essa secagem controlada é essencial para evitar defeitos como empenamentos, fissuras e perda de resistência.

No contexto do desempenho ao fogo, o teor de umidade desempenha papel crítico, especialmente nas fases iniciais da exposição térmica. Ao ser submetida ao aquecimento, a madeira de *Pinus* apresenta redistribuição interna da umidade, seguida de rápida evaporação ao atingir temperaturas superiores a 100 °C, o que contribui para a formação de zonas de carbonização e descolamento térmico das camadas superficiais (Figuerola, 2005).

A norma EN 13183-1:2002, amplamente utilizada na Europa, também define métodos de medição do teor de umidade em produtos de madeira serrada, e recomenda que, para uso estrutural, a madeira apresente variações de umidade inferiores a 3% em relação ao valor nominal, como forma de controle de qualidade e garantia do desempenho em serviço. Essa restrição visa evitar deformações excessivas e variações dimensionais indesejadas, sobretudo em elementos estruturais como vigas, pilares e painéis laminados.

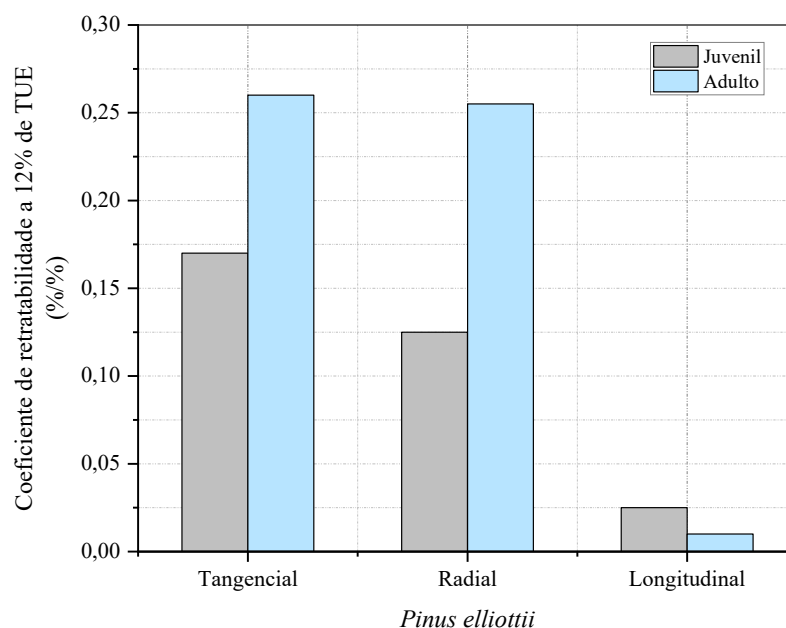
Em análises numéricas, o teor de umidade pode ser parametrizado em modelos termo-higroscópicos para simular a perda de massa por secagem e a influência da umidade na condutividade térmica e capacidade calorífica. Além disso, a umidade afeta diretamente a velocidade de propagação de chamas e a taxa de carbonização, sendo essencial sua consideração em modelos de degradação térmica da madeira (Gu e Hunt, 2007; Kotoulek, 2019).

2.4.2.3 Retração

A retração é uma propriedade física fundamental da madeira que descreve a variação dimensional do material em função da perda de umidade. Trata-se de um comportamento higroscópico intrínseco ao material lenhoso e está diretamente associado à anisotropia da

madeira. Ao secar, a madeira encolhe de forma desigual nas três direções principais: longitudinal, radial e tangencial. Esse fenômeno se inicia quando a madeira atinge o ponto de saturação das fibras, e se intensifica até atingir o equilíbrio higroscópico, com cerca de 12% de umidade. Estudos demonstram que a proporção de lenho juvenil e adulto dentro no *Pinus elliottii* influencia diretamente na retratibilidade tangencial, radial e longitudinal, conforme a [Figura 17](#) (Pelozzi *et al.*, 2012).

Figura 17 - Coeficientes de retratibilidade tangencial, radial e longitudinal a 12% dos lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii*.



Fonte: Adaptado de Pelozzi *et al.* (2012).

Para o gênero *Pinus glabra*, as retrações tangencial e radial são particularmente relevantes, com valores médios de aproximadamente 5,69% e 3,91%, respectivamente, conforme dados apresentados por (Modes *et al.*, 2021a) . A retração longitudinal, por sua vez, é considerada desprezível na maioria dos casos, situando-se abaixo de 0,5%. A relação entre retração tangencial e radial (chamada de fator de anisotropia da retração) é geralmente maior que 1,5, indicando maior instabilidade dimensional no sentido tangencial.

Segundo a NBR 7190:2022, a determinação da retração volumétrica da madeira é realizada a partir da medição dimensional das amostras em diferentes teores de umidade, desde o estado saturado até o estado anidro. Esse procedimento permite identificar não apenas o percentual de retração, mas também a estabilidade dimensional da espécie em questão.

A retração da madeira é um fator crucial durante o processo de secagem, pois variações desiguais entre as regiões da peça podem ocasionar empenamentos, rachaduras, fendas e

colapsos. Esses defeitos impactam negativamente a integridade estrutural e estética do material. Por isso, práticas de secagem controlada e utilização de métodos como a secagem em estufa são recomendadas, conforme descrito nas normas EN 13183-1:2002 e a ASTM D4442-20.

Além disso, a retração tem implicações importantes em estruturas submetidas a variações climáticas, como pontes ou construções em regiões de alta umidade relativa. A movimentação dimensional contínua pode afetar as conexões e causar falhas ao longo do tempo (Angst e Malo, 2012). O conhecimento da retração da madeira permite a seleção mais apropriada de espécies para determinadas aplicações, especialmente aquelas onde a estabilidade dimensional é crítica. No caso do *Pinus*, embora apresente retrações relativamente elevadas em comparação a outras madeiras, seu uso é amplamente viável desde que seja corretamente beneficiado e protegido contra variações hídricas extremas.

2.4.3 Propriedades mecânicas da madeira

As propriedades mecânicas da madeira representam um conjunto fundamental de parâmetros que descrevem o comportamento do material frente a solicitações externas, e sua adequada caracterização é essencial para o projeto e dimensionamento de estruturas seguras, duráveis e eficientes. Essas propriedades englobam a resistência da madeira à compressão, tração, flexão, cisalhamento, além de sua rigidez (módulo de elasticidade), dureza e tenacidade. Cada uma delas reflete a interação entre a estrutura anatômica da madeira, suas características físicas (como densidade e umidade) e a orientação dos esforços em relação às fibras.

Bodig e Jayne (1982) discutiram extensivamente as propriedades mecânicas da madeira, destacando que espécies utilizadas com fins estruturais podem apresentar resistências significativas à compressão e à tração, mesmo possuindo densidades relativamente baixas. Essa característica confere à madeira uma elevada relação resistência/peso, atributo fundamental para o desenvolvimento de estruturas leves, eficientes e economicamente viáveis.

Contudo, a natureza heterogênea e anisotrópica da madeira demanda uma análise criteriosa quanto à atuação de combinações de esforços, especialmente em situações de carregamento complexo. Essa atenção é essencial para estimar adequadamente as propriedades de rigidez e resistência ao longo de toda a vida útil da estrutura, contribuindo para projetos seguros e duráveis (Filho *et al.*, 2018).

Nesta seção, são abordadas as principais propriedades mecânicas da madeira, com ênfase nas características apresentadas pelas espécies do gênero *Pinus*, dada sua ampla utilização no setor da construção civil e em pesquisas científicas. A exposição dos conceitos é

fundamentada nas diretrizes estabelecidas pelas principais normas técnicas de referência, como a NBR 7190:2022, os padrões da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e as normas europeias da série EN.

As normas internacionais mais utilizadas são a norma americana ASTM D198 e a europeia EN 408. A norma ASTM foca em métodos de ensaio de elementos estruturais de madeira e apresenta abordagens similares à Norma Brasileira (NBR), mas com maior ênfase na padronização de corpos de prova e no controle de alinhamento das cargas. Já a EN 408 é mais detalhada no uso de dispositivos eletrônicos para medição de deformações e promove maior rigor na análise de comportamento elástico e plástico, muitas vezes incorporando medidores de deformação e critérios de fluência. Além disso, a EN 408 utiliza conceitos como “resistência característica” e “limites de deformação aceitáveis”, alinhando-se aos princípios do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1), que rege o dimensionamento estrutural de madeira na Europa.

Comparativamente, a NBR 7190:2022 se mostra mais acessível e prática para aplicação em campo, com menor rigor metrológico. Em contrapartida, as normas EN e ASTM proporcionam uma maior precisão laboratorial e detalhamento estatístico, sendo mais adequadas para pesquisas avançadas e validações numéricas complexas. Uma diferença importante reside na consideração de fatores de modificação e coeficientes de segurança, que na NBR seguem um modelo semi-probabilístico distinto do adotado na Europa ou nos Estados Unidos da América (EUA). Essa divergência afeta diretamente o valor final adotado para cada propriedade, influenciando os parâmetros de entrada em modelos computacionais.

A finalidade desta abordagem é fornecer uma compreensão basilar sobre cada uma dessas propriedades, expondo sua importância para o desempenho estrutural da madeira e os métodos recomendados para sua determinação. Dessa forma, busca-se subsidiar as análises estruturais com informações técnicas, essenciais também no contexto da modelagem, simulação e dimensionamento de elementos construtivos em madeira.

2.4.3.1 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), representa a capacidade da madeira em suportar esforços compressivos aplicados ao longo da direção longitudinal das fibras. A orientação paralela das fibras confere à madeira elevada resistência, uma vez que a disposição celular longitudinal favorece a transmissão de esforços compressivos. Essa característica está diretamente associada à estrutura anatômica da madeira e ao grau de alinhamento das fibras.

Segundo a NBR 7190-3:2022, a determinação da resistência à compressão paralela às fibras deve ser realizada por métodos de ensaio com corpos de prova isentos de defeitos. O ensaio consiste na aplicação de compressão uniaxial em corpos de prova prismáticos, dimensionados conforme proporções definidas para representar adequadamente o comportamento mecânico da madeira. As condições de umidade devem ser padronizadas, adotando-se preferencialmente o teor de 12%, a fim de assegurar comparabilidade entre resultados.

Quando não é possível garantir a homogeneidade do material, situação comum em espécies de florestas plantadas sujeitas a maior variabilidade, a norma que a resistência seja aferida por peça estrutural, de acordo com a ABNT NBR 7190-2:2022.

Do ponto de vista normativo internacional, a norma europeia EN 408 (ensaio estruturais de madeira serrada) e a norma americana ASTM D198 (ensaio de elementos estruturais de madeira) também descrevem metodologias equivalentes para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras. A principal diferença reside nos critérios de preparação dos corpos de prova e nos métodos de leitura de deformações, sendo comum o uso de extensômetros ou transdutores de deslocamento linear (LVDTs) em normas estrangeiras para avaliar simultaneamente o módulo de elasticidade.

A resistência à compressão paralela é sensível a diversos fatores, como a densidade da madeira, a presença de defeitos (nós, rachaduras e desvios de fibra) e o teor de umidade. Em espécies de alta densidade, observa-se uma maior resistência, dado o maior número de fibras por unidade de volume. No entanto, é importante considerar que a falha por flambagem pode ocorrer em peças esbeltas, mesmo antes da ruptura mecânica da madeira. Por isso, além da resistência mecânica pura, critérios de estabilidade estrutural devem ser aplicados no projeto de elementos comprimidos.

2.4.3.2 Resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{c90})

É a capacidade da madeira em suportar esforços compressivos aplicados transversalmente à direção das fibras, denotada por f_{c90} . Essa propriedade é significativamente inferior à resistência paralela, refletindo a natureza anisotrópica da madeira. A explicação para esse comportamento reside na estrutura celular da madeira onde as fibras alongadas são eficientes na condução de forças longitudinais, mas oferecem menor resistência quando os esforços incidem transversalmente, comprimindo os espaços intercelulares ou colapsando as paredes celulares.

A aplicação prática da resistência à compressão perpendicular às fibras encontra relevância em situações de apoios concentrados, ligações com pinos, chapas ou parafusos, e em regiões de contato entre peças estruturais. Devido à baixa resistência transversal, é comum que a madeira apresente deformações significativas antes da ruptura nessas situações. Assim, o valor de f_{c90} influencia diretamente o dimensionamento das áreas de apoio e o comportamento de ligações mecânicas, sendo um parâmetro essencial para evitar assentamentos excessivos e garantir a integridade das conexões.

De forma semelhante a norma brasileira NBR 7190:2022, tanto a EN 408 quanto a ASTM D198 contemplam a medição da resistência à compressão perpendicular. Porém, a EN 408 estabelece procedimentos específicos para cargas de curta duração e limites de deformação compatíveis com aplicações estruturais, enquanto a norma americana frequentemente utiliza o conceito de “*compressive bearing strength*”, focando em situações de contato entre componentes (como vigas apoiadas sobre pilares), sendo comum o uso de valores médios ou limites de fluência, em vez de cargas máximas.

2.4.3.3 Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0})

Dentre as propriedades mecânicas, esta é uma das que apresenta maior magnitude, superando inclusive a resistência à compressão no mesmo sentido. Isso se deve ao fato de que, quando solicitada longitudinalmente, a madeira mobiliza a coesão entre as células e a integridade das fibras, que são naturalmente orientadas nesta direção. Esta característica é especialmente importante em elementos estruturais como treliças, cordas superiores e inferiores de vigas e em peças sujeitas a esforços de tração direta.

Conforme a NBR 7190-3:2022, o ensaio para obtenção de f_{t0} é realizado com corpos de prova alongados submetidos à tração axial em máquina universal. A falha ocorre geralmente por ruptura frágil da madeira, ao redor de defeitos naturais da peça como nós ou trincas.

Na prática, a resistência à tração paralela às fibras é determinante para o dimensionamento de ligações com barras de ancoragem, parafusos ou colagens estruturais em madeira lamelada colada (MLC/GLT). Além disso, essa propriedade é essencial na modelagem computacional de peças solicitadas à tração pura ou submetidas a esforços combinados.

As normas internacionais, como a EN 408 e a ASTM D198, também preveem metodologias similares, embora com variações no formato dos corpos de prova e nos critérios de ruptura. A ASTM, por exemplo, enfatiza a importância do alinhamento axial para evitar flexão residual durante o ensaio, que pode comprometer os resultados. Já a EN 408 adota

critérios mais rigorosos quanto à preparação das superfícies de fixação dos corpos de prova, visando garantir tração pura.

2.4.3.4 Resistência à tração perpendicular às fibras (f_{t90})

A resistência à tração perpendicular às fibras, expressa a capacidade da madeira de resistir a esforços trativos aplicados transversalmente à direção das fibras. Essa é a propriedade mecânica de menor valor dentre todas as analisadas, o que se explica pela estrutura celular da madeira, que favorece o descolamento intercelular quando tracionada nesta direção. A baixa resistência transversal torna a madeira particularmente suscetível a falhas por delaminação, destacamento de camadas e fissuras transversais.

Apesar de seu baixo valor, possui papel relevante em aplicações estruturais específicas, como na avaliação da resistência de painéis colados, madeira lamelada colada (MLC/GLT) e elementos sujeitos a tensões de arrancamento. Em sistemas onde a adesão entre camadas ou componentes é crítica, a resistência à tração perpendicular pode ser o fator limitante do desempenho estrutural.

De acordo com a NBR 7190:2022, o ensaio de tração perpendicular às fibras é realizado com corpos de prova preparados de modo a garantir a aplicação de força normal à direção das fibras. Nas normas internacionais, essa propriedade é menos frequentemente avaliada de forma direta. As normas EN 408 e ASTM D198 reconhecem sua importância, mas frequentemente a tratam em ensaios compostos ou indiretos, como em testes de aderência de colagens ou delaminação de peças coladas. Na prática, a resistência f_{t90} é inferida com base em ensaios de ligação ou por parâmetros empíricos derivados de estudos experimentais.

2.4.3.5 Resistência à flexão estática (f_M)

A resistência à flexão estática, é uma das propriedades muito utilizadas para caracterizar o comportamento mecânico da madeira, sobretudo em elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, como vigas, pranchas e barrotes. Esta resistência é obtida por meio de ensaios de flexão em três ou quatro pontos, nos quais se observa o comportamento da peça até a ruptura. A capacidade da madeira em resistir à flexão é determinada, em grande parte, pela integridade das fibras na região tracionada, sendo que falhas ocorrem geralmente nessa face.

O ensaio de flexão estática, determinado pela norma NBR 7190:2022, utiliza corpos de prova com seção retangular apoiados em duas extremidades, sobre os quais aplica-se uma carga

concentrada para ensaios a três pontos ou duas cargas simétricas para ensaios a quatro pontos. A resistência à flexão é calculada pela [equação 1](#):

$$f_M = \frac{3.P_{max}.l}{2.b.d^2} \quad (1)$$

Onde P_{max} é a carga máxima aplicada em Newtons (N), l é o vão entre apoios em milímetros (mm), b é a largura da seção transversal em milímetros (mm) e d é a altura da peça em milímetros (mm). Para o caso de flexão em quatro pontos, a equação é ajustada para considerar o intervalo entre as cargas aplicadas.

A norma ASTM D198 apresenta uma abordagem semelhante à brasileira, com variações no espaçamento entre os apoios e na forma de aplicação da carga. Ambas enfatizam a necessidade de evitar instabilidades laterais durante o ensaio e de registrar as deformações na face tracionada da peça. A norma europeia EN 408 também estabelece procedimentos análogos para o ensaio de flexão, com maior detalhamento sobre a medição de deformações e uso de equipamentos para controle eletrônico da carga

A resistência à flexão estática é influenciada por diversos fatores, como a presença de nós, a orientação das fibras, o teor de umidade e a taxa de crescimento das células. Em espécies de madeiras de crescimento rápido, como o *Pinus*, a heterogeneidade anatômica pode impactar significativamente o resultado do ensaio. Além disso, a resistência à flexão apresenta correlação moderada com outras propriedades mecânicas, sendo frequentemente utilizada como base para estimativas indiretas de propriedades como o módulo de elasticidade ou a resistência à tração.

Para simulações numéricas, para essa propriedade é fundamental a definição dos critérios de falha em elementos submetidos à flexão pura ou composta. Modelagens utilizando o método dos elementos finitos tendem a aplicar essa resistência como valor limite para a zona de tração na análise de tensões.

2.4.3.6 Módulo de elasticidade (E)

O módulo de elasticidade quantifica a rigidez da madeira e sua capacidade de deformar elasticamente sob a ação de tensões normais. Esta propriedade é de grande importância para o dimensionamento de estruturas de madeira ao permitir prever a deformação das peças sob cargas de serviço. Essa propriedade é calculada a partir da inclinação da curva tensão-

deformação no regime linear elástico e pode ser determinado tanto na direção paralela quanto perpendicular às fibras.

O módulo de elasticidade longitudinal é determinado com mais frequência, dada sua relevância em peças estruturais solicitadas à flexão, tração ou compressão paralela às fibras. Pela norma NBR 7190:2022, o valor da propriedade é obtido durante o ensaio de flexão estática, a partir da inclinação da curva carga *versus* flecha, dentro da faixa elástica do material. A expressão adotada na [equação 2](#) para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal é:

$$E = \frac{P.L^3}{4.f.b.d^3} \quad (2)$$

O módulo de elasticidade é uma propriedade altamente sensível à densidade, ao teor de umidade e à orientação das fibras. Adicionalmente, pode apresentar anisotropia relevante, sendo maior na direção longitudinal em comparação com as direções radial e tangencial.

Do ponto de vista computacional, é uma propriedade relevante na que delimita a definição do comportamento elástico do material. É o módulo de elasticidade que determina a rigidez da matriz constitutiva do modelo e influencia diretamente os deslocamentos e deformações calculadas. Portanto, essa propriedade também serve como parâmetro de entrada para modelos de previsão de falhas, critérios de verificação em serviço e análises dinâmicas.

2.4.3.7 Módulo de ruptura (f_R)

Essa propriedade traduz-se na tensão máxima que a madeira suporta na região tracionada durante a flexão, imediatamente antes da ruptura. Ela está diretamente relacionada à resistência última do material, embora esteja associada ao ensaio de flexão estática, difere do módulo de elasticidade por se referir ao limite último de resistência e não ao comportamento elástico.

Na engenharia estrutural, é utilizada como parâmetro de dimensionamento em elementos sujeitos a flexão simples ou composta, sendo fundamental para verificações de resistência última. É comum o uso de em conjunto com o módulo de elasticidade para avaliar tanto a rigidez quanto a resistência das peças estruturais.

O valor do módulo de ruptura está fortemente correlacionado com a qualidade das fibras na zona tracionada, sendo afetado pela presença de nós, inclinação das fibras, densidade da

madeira e condições de umidade. Essas variabilidades anatômicas exigem cuidadosa seleção dos corpos de prova para garantir representatividade nos resultados.

O módulo de ruptura representa uma propriedade mecânica relevante para o cálculo estrutural, fornecendo subsídios essenciais para a segurança e desempenho das estruturas, assim como para as validações ou calibrações computacionais de comportamento não linear em caso de análises de modelos numéricos.

2.4.3.8 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

A capacidade da madeira para resistir a tensões cortantes atuando paralelamente às fibras é intitulada resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}). Essa propriedade é essencial na avaliação da integridade estrutural de elementos submetidos a esforços transversais, especialmente em regiões próximas aos apoios ou nos pontos de aplicação de carga. Diferente da tração ou compressão, o cisalhamento provoca o deslizamento relativo entre camadas adjacentes de fibras, sendo, portanto, influenciado pela coesão interna da madeira e pela integridade da parede celular.

Para a determinação dessa propriedade, a norma NBR 7190:2022, especifica o ensaio que deve ser realizado por meio de corpos de prova prismáticos, submetidos à força cortante direta em uma configuração específica que busca isolar a tensão cisalhante. A norma especifica que a ruptura deve ocorrer por deslizamento longitudinal, sem envolvimento de flexão ou esmagamento, exigindo um controle rigoroso na preparação e aplicação de carga.

Normas internacionais como a ASTM D198 e a EN 408 também contemplam ensaios de cisalhamento longitudinal, embora com variações metodológicas. A ASTM propõe o uso de dispositivos de carregamento com fixações rígidas para assegurar a aplicação pura da força cisalhante, enquanto a EN 408 enfatiza a medição da deformação associada ao cisalhamento, fornecendo uma caracterização mais completa do comportamento da madeira. Em ambos os casos, a presença de defeitos naturais, como trincas ou nós, é um fator crítico que pode reduzir significativamente a resistência obtida.

Em termos estruturais, a resistência ao cisalhamento longitudinal é importante no dimensionamento de vigas, especialmente nas regiões próximas aos apoios, onde ocorrem os maiores esforços cortantes. Em sistemas de madeira lamelada colada, o cisalhamento entre lamelas também deve ser avaliado, uma vez que a integridade da colagem depende da resistência ao deslizamento longitudinal das camadas.

Além disso, f_{v0} é uma propriedade comumente utilizada em modelagens computacionais, em especial na definição de critérios de falha para materiais anisotrópicos. Modelos de elementos finitos frequentemente utilizam critérios de Hill, Tsai-Wu ou Hoffman, nos quais o cisalhamento paralelo às fibras tem papel categórico na previsão de colapso. Em análises não-lineares, a correta definição desse parâmetro permite prever falhas por delaminação ou deslizamento entre camadas em estruturas compostas.

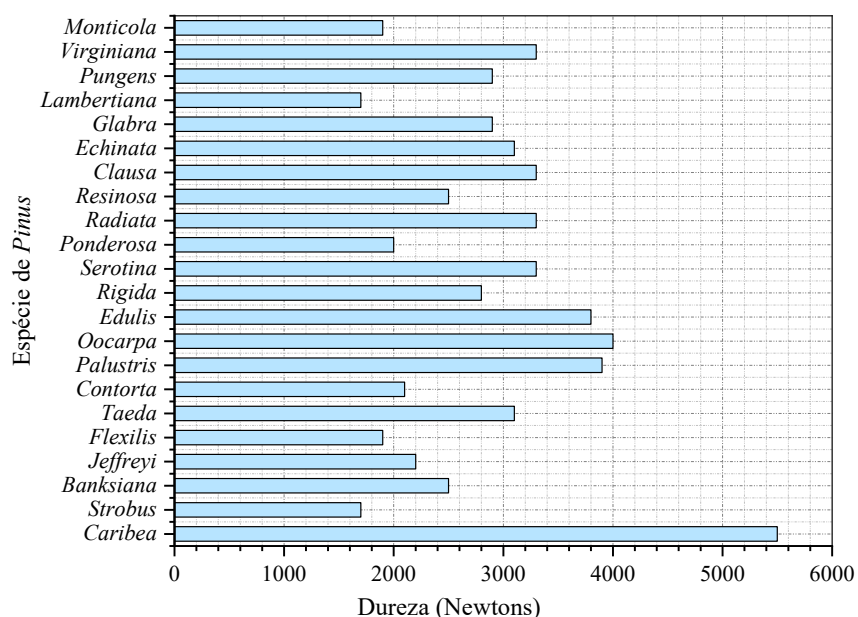
2.4.3.9 Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica da madeira que denota a resistência do material à penetração ou à deformação por pressão concentrada, geralmente associada ao impacto ou ao desgaste superficial. No caso da madeira de *Pinus*, essa característica assume especial importância dentro do contexto estrutural devido a utilização da madeira em elementos estruturais sujeitos ao contato e abrasão.

Os ensaios de dureza são normalmente realizados segundo métodos padronizados, como o teste de *Janka*, que consiste na medição da força necessária para cravar uma esfera metálica de 11,28 mm de diâmetro até a metade do seu volume na superfície da madeira. A norma NBR 7190:2022 recomenda o uso de procedimentos equivalentes, sendo a dureza expressa em Newtons (N). É importante lembrar que os valores de dureza variam entre espécies, interespecies e podem ainda variar dentro de uma mesma amostra, em função da densidade e do teor de umidade.

No caso particular do *Pinus*, classifica-se como madeira de baixa a média dureza. As interespecies do *Pinus* apresentam valores de dureza entre 1700 e 5.500 N ([Figura 18](#)). O valor médio para o *Pinus* fica em 2.850N, enquanto espécies tropicais mais densas podem ultrapassar 7.000 N. Essa característica limita o uso do *Pinus* em demandas de alta resistência ao desgaste, por outro lado, por conta da sua trabalhabilidade, se torna vantajoso para industrialização.

A propriedades de dureza da madeira de *Pinus* é fortemente influenciada pela densidade aparente, que por sua vez depende da proporção entre lenho tardio e lenho inicial. Outra variável relevante é o teor de umidade da madeira, pois amostras com alta umidade tendem a apresentar valores de dureza menores por conta da plasticidade aumentada das paredes celulares. Por isso, os ensaios devem ser realizados em condições padronizadas, geralmente a 12% de umidade, para garantir resultados comparáveis.

Figura 18 - Dureza das espécies de *Pinus*.

Fonte: Adaptado de <https://www.sizes.com/units/janka.htm>
 Acessado em 09/05/2025 às 13:03h

2.4.3.10 Tenacidade

Essa propriedade condiz na capacidade de um material absorver energia até a fratura, sendo uma propriedade essencial para a avaliação da resistência ao impacto e ao comportamento dúctil da madeira. No contexto das madeiras estruturais, a tenacidade é particularmente relevante para situações em que ocorrem esforços dinâmicos, choques ou cargas repentinas, como em estruturas sujeitas a ações sísmicas, impactos acidentais ou falhas progressivas.

A madeira de *Pinus* apresenta, em geral, tenacidade moderada, com significativa variação em função da densidade, orientação das fibras e presença de defeitos naturais. Espécies como *Pinus* demonstra um bom desempenho em testes de impacto, superando muitas madeiras densas em absorção de energia, graças à sua estrutura celular mais flexível e à capacidade de deformação antes da ruptura.

Os ensaios de tenacidade são realizados utilizando métodos como o impacto Charpy, em que uma viga com entalhe é submetida a uma carga de impacto gerada por um pêndulo. A energia absorvida até a fratura é registrada como indicativo da tenacidade. Alternativamente, métodos de tração ou flexão dinâmica também podem ser utilizados para caracterizar essa propriedade.

A orientação das fibras exerce papel crucial na tenacidade do *Pinus*. Ensaios realizados ao longo das fibras (direção longitudinal) costumam apresentar maior absorção de energia, pois as fibras resistem de forma progressiva à fratura. Em contrapartida, a tenacidade transversal é substancialmente menor, com ruptura abrupta por delaminação intercelular.

Em aplicações estruturais, a tenacidade da madeira deve garantir o comportamento seguro sob eventos extremos. A madeira com maior tenacidade tende a apresentar sinais visíveis de deformação antes da ruptura, conferindo aviso prévio ao colapso e aumentando a resiliência da estrutura.

2.5 COMPORTAMENTO DA MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Em ambientes expostos ao fogo, a madeira apresenta uma sequência de reações térmicas complexas que envolvem a evaporação da umidade, a pirólise dos componentes orgânicos, a liberação de gases voláteis e, eventualmente, a ignição e propagação das chamas. Esses fenômenos, além de comprometerem a integridade estrutural do material, geram produtos combustíveis que alimentam o incêndio. A vulnerabilidade ao fogo tem motivado diversas pesquisas com foco em retardantes de chama, buscando melhorar a estabilidade térmica da madeira e reduzir sua inflamabilidade (Jiang, Li e Gao, 2015).

As estruturas de madeira, quando expostas a situações de incêndio, apresentam um comportamento térmico e mecânico distinto em relação a outros materiais de construção convencionais, como o aço e o concreto. Embora a madeira seja um material combustível por natureza, suas propriedades térmicas intrínsecas conferem-lhe um desempenho relativamente satisfatório frente ao fogo. Destacam-se, nesse contexto, a baixa condutividade térmica e a capacidade de formação de uma camada carbonizada na superfície exposta às chamas, a qual atua como isolante térmico, retardando a propagação do calor para o interior do elemento. Esse fenômeno contribui para a preservação parcial da integridade estrutural da seção remanescente. Todavia, à medida que a exposição ao calor se intensifica, ocorre a degradação progressiva dos constituintes químicos da madeira, comprometendo suas propriedades mecânicas essenciais, como a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade (Damasceno Silva, 2022).

O comportamento térmico da madeira durante a exposição ao fogo pode ser segmentado em três zonas distintas: a camada carbonizada, a zona de degradação térmica e o núcleo intacto. A primeira, correspondente à superfície exposta, possui rigidez e resistência estrutural desprezíveis devido à completa deterioração dos componentes lignocelulósicos. A zona intermediária, por sua vez, caracteriza-se por alterações significativas nas propriedades

mecânicas, em virtude da elevação gradual da temperatura e, por fim, o núcleo central permanece temporariamente com suas propriedades mecânicas originais, até que a frente de carbonização o atinja (Fernandes, 2022). Diante desse processo, torna-se fundamental o estudo da taxa de carbonização e dos mecanismos de transferência de calor envolvidos, a fim de prever com maior precisão o desempenho residual da madeira em situações de incêndio.

A espécie *Pinus*, empregada em sistemas estruturais, integra o grupo das coníferas e é reconhecida por sua leveza, rápido crescimento e viabilidade industrial. No entanto, quando comparada a espécies folhosas como o *Eucalyptus spp.*, o *Pinus* apresenta menor densidade aparente, o que o torna mais vulnerável ao avanço da frente de carbonização. Ensaios experimentais realizados com as espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda* evidenciam taxas médias de carbonização variando entre 0,95 mm/min e 1,10 mm/min, superiores às aquelas observadas em madeiras de maior densidade (Fernandes, 2022). Essa suscetibilidade reforça a necessidade de uma criteriosa seleção da espécie a ser utilizada em projetos estruturais, especialmente quando submetidos a riscos de incêndio, além da adoção de tratamentos ignífugos que possam reduzir a velocidade de carbonização e ampliar a segurança contra o fogo.

2.5.1.1 Mecanismos de transferência de calor

A propagação do calor em elementos estruturais de madeira submetidos à ação do fogo ocorre por meio de três mecanismos principais de transferência térmica: condução, convecção e radiação. A condução térmica constitui o mecanismo predominante de transporte de calor no interior do sólido, sendo diretamente condicionada pela condutividade térmica da madeira. Esta, por sua vez, apresenta valores relativamente baixos, da ordem de 0,13 W/m.K, o que implica em uma elevação de temperatura progressiva e gradual nas camadas internas do elemento, contribuindo para o retardo na propagação da frente de calor (Pinto, 2005).

Por outro lado, a radiação térmica adquire relevância nas fases iniciais e intermediárias da exposição ao fogo, sobretudo em superfícies diretamente expostas às chamas ou a gases superaquecidos. O coeficiente de absorção de radiação da madeira varia conforme a espécie, cor e rugosidade superficial, fatores que influenciam a taxa de aquecimento inicial. Modelos numéricos aplicados à análise térmica consideram valores de emissividade em torno de 0,8 para a madeira in natura e até 0,9 para a camada carbonizada formada após o início da pirólise (Martins, 2016).

Já a convecção térmica é responsável pela troca de calor entre os gases quentes em movimento e as superfícies da madeira. Em condições típicas de incêndio, os coeficientes de

transferência convectiva situam-se entre 20 e 25 W/m².K, variando conforme a velocidade e a turbulência do fluxo gasoso no ambiente. Esse mecanismo afeta predominantemente as faces diretamente expostas dos elementos estruturais, sendo especialmente crítico em regiões inferiores e laterais das vigas, onde há maior acúmulo e circulação de gases superaquecidos, resultando em uma elevação local mais acentuada da temperatura (Fernandes, 2022).

A ação combinada desses mecanismos estabelece um gradiente térmico significativo ao longo da seção transversal dos elementos de madeira. Esse gradiente provoca uma heterogeneidade no comportamento mecânico da seção, uma vez que as regiões mais externas sofrem degradação acelerada, enquanto o núcleo permanece relativamente intacto por períodos mais longos. A condução, apesar de seu caráter difusivo mais lento, é responsável direta pelo avanço da frente de carbonização em direção ao interior da peça, ao passo que a radiação e a convecção são os principais agentes de aquecimento e ignição superficial.

Espécies de menor densidade, como o *Pinus spp.*, são particularmente susceptíveis aos efeitos combinados da convecção e radiação. Essa vulnerabilidade se deve à menor massa térmica e à maior permeabilidade anatômica, características que facilitam o transporte de calor e a propagação de gases voláteis no interior da madeira. A presença de lúmens de grande dimensão nas células do *Pinus* permite maior circulação de calor e vapores, acelerando o processo de carbonização, conforme observado em estudos comparativos com espécies folhosas de maior densidade (Pinto, 2005).

Dessa forma, ao se considerar o dimensionamento de estruturas de madeira expostas ao fogo, é imperativo reconhecer que a transferência de calor não se restringe à superfície dos elementos, mas resulta de uma complexa interação entre parâmetros térmicos, geométricos e ambientais. Modelos empíricos, como o método da seção transversal reduzida, e análises computacionais avançadas devem incorporar essas variáveis para que a previsão do desempenho termoestructural da madeira sob incêndio seja condizente com as condições reais de exposição. A precisão dessas abordagens é fundamental para garantir a segurança estrutural e a eficiência das estratégias de proteção adotadas.

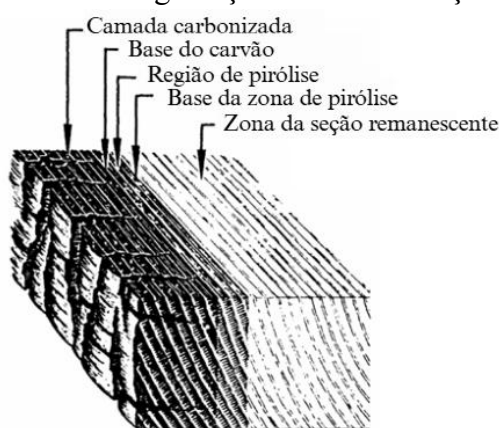
2.5.1.2 Carbonização da madeira

Quando da ignição do processo de incêndio, ocorre a carbonização da madeira em taxas relativamente constantes, o que permite prever a seção remanescente resistente ao longo do tempo. Essa característica é particularmente útil na análise estrutural do compósito em condição de incêndio, pois permite a aplicação de modelos de dimensionamento com base em parâmetros

empíricos. Em paralelo, para a obtenção de resultados satisfatoriamente elegíveis, existe a necessidade da consideração das variações das propriedades térmicas e mecânicas com a temperatura.

A carbonização da madeira consiste no processo de degradação térmica (Figura 19) de seus constituintes orgânicos (celulose, hemicelulose e lignina) em decorrência da exposição a elevadas temperaturas, resultando na formação de uma camada superficial de carvão. Segundo normas técnicas e evidências experimentais, inicia-se geralmente em temperaturas situadas entre 280 °C e 300 °C (Fernandes, 2022). Entre as variáveis que influenciam significativamente o desempenho de elementos estruturais em situação de incêndio, destaca-se a taxa de carbonização, usualmente expressa em milímetros por minuto (mm/min), uma vez que define a velocidade de comprometimento da seção útil da peça.

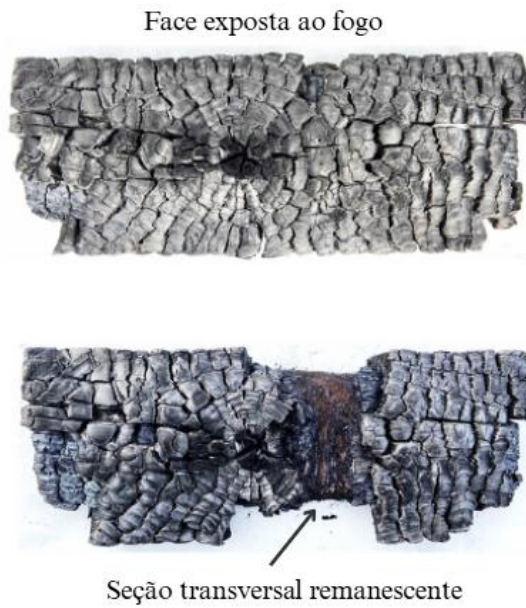
Figura 19 - Zonas de degradação inerentes a seção da madeira.



Fonte: Adaptado de Schaffer (1967).

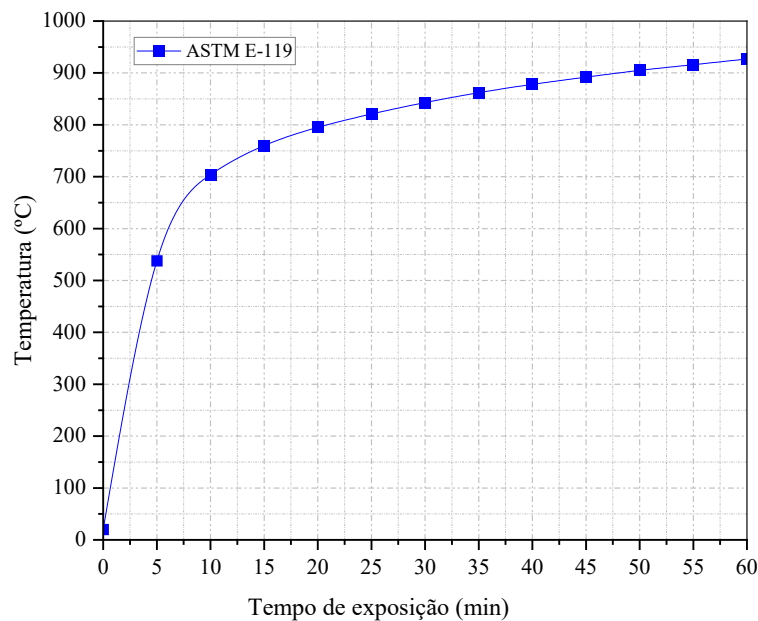
A camada carbonizada formada apresenta uma condutividade térmica ainda inferior à da madeira íntegra, estimada em aproximadamente 0,041 W/m.K, o que contribui para o efeito de isolamento térmico das camadas internas. Apesar desse efeito protetor, a camada não possui capacidade resistente significativa, devendo ser desconsiderada nas avaliações estruturais. Por essa razão, a correta determinação da taxa de carbonização é fundamental para a estimativa da seção transversal remanescente ao longo do tempo de exposição ao fogo (Figura 20), sendo uma variável determinante para a definição da resistência residual dos elementos.

Figura 20 - Camada de carbonização e seção transversal remanescente pós-incêndio.



Fonte: Adaptado de NGUYEN (2023).

Figura 21 - Curva de incêndio-padrão ASTM E-119-1.



Fonte: Adaptado de ASTM E-119-1.

Schaffer (1967) conduziu um estudo experimental para quantificar as taxas de carbonização da madeira exposta ao fogo perpendicularmente às fibras, com o objetivo de substituir métodos empíricos por dados mais precisos no dimensionamento estrutural. Os ensaios foram realizados sob temperaturas constantes (538 °C, 816 °C e 927 °C) e segundo a curva padrão da norma ASTM E-119-1 (Figura 21). Foram analisadas as madeiras *Douglas-fir* (Abeto Douglas), *Southern pine* (Pinheiro do sul) e *White oak* (Carvalho branco), considerando

fatores como densidade, umidade e orientação dos anéis. Verificou-se que a taxa de carbonização estabiliza após a formação de 1/4 de polegada de carvão, sendo maior em madeiras menos densas e mais secas.

O estudo levantou modelos para estimar a taxa das espécies *Douglas-fir* (Abeto Douglas), *Southern pine* (Pinheiro do sul) e *White oak* (Carvalho branco) por meio de regressões lineares (Equações 3, 4 e 5 respectivamente). Nessas equações, β representa a taxa de carbonização (mm/min), μ é o teor de umidade e ρ é a densidade aparente da madeira (kg/m^3). Nos modelos apresentados, a taxa de carbonização é assumida como constante ao longo do tempo de exposição ao fogo, o que configura uma simplificação do fenômeno, uma vez que, na prática, a carbonização ocorre de forma não linear devido à formação progressiva da camada de carvão e suas propriedades isolantes. Assim, trata-se de uma abordagem linear que busca fornecer estimativas práticas para uso em análises de dimensionamento estrutural sob condições de incêndio.

$$\beta = \frac{1}{(0,002269+0,00457.\mu).\rho+0,331} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{(0,00461+0,00095.\mu).\rho+1,016} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{(0,001583+0,00318.\mu).\rho+0,594} \quad (5)$$

No estudo desenvolvido por White (1998), a carbonização da madeira foi analisada considerando o impacto de diferentes propriedades físicas e anatômicas das espécies sobre a formação da camada carbonizada em situações de incêndio. A carbonização é um fenômeno crítico que compromete a seção resistente da madeira, sendo influenciado por fatores como densidade, umidade e direção das fibras. Para a condução dos ensaios, foi adotada a curva padrão ASTM E-119-1, que representa a evolução típica da temperatura em incêndios reais, com aquecimento progressivo e contínuo. A partir dessa curva, foram avaliadas as taxas de carbonização de várias espécies, com destaque para o *Douglas-fir* (Abeto de Douglas), *Southern Pine* (Pinheiro do Sul), *Red Oak* (Carvalho vermelho) e *White Oak* (Carvalho branco). Os resultados obtidos evidenciaram que madeiras de maior densidade tendem a apresentar taxas de carbonização mais baixas, enquanto espécies menos densas carbonizam mais rapidamente. Além disso, verificou-se que a orientação dos anéis de crescimento e o teor de umidade inicial também influenciam significativamente a profundidade e a uniformidade da carbonização ao longo do tempo.

White (1998) propôs alternativamente um modelo não linear para estimar a taxa de carbonização da madeira. Seu modelo é fundamentado na análise dos resultados obtidos conforme os ensaios experimentais realizados em oito espécies diferentes, sendo expresso pela equação:

$$t = m \cdot x^{1,23} \quad (6)$$

Onde t é o tempo de exposição ao fogo (min), m é o coeficiente da taxa de carbonização ($\text{min/mm}^{1,23}$) e x representa a espessura da camada carbonizada (mm).

Babrauskas (2005) revisou uma série de estudos sobre taxa de carbonização em diversas espécies de madeira, incluindo o abeto de Douglas, pinheiro do sul, carvalho, abeto e cedro. Uma ampla variedade de dados experimentais foi levantada com o objetivo de compreender até que ponto os padrões de carbonização podem indicar características relevantes do incêndio, como sua duração ou origem. A carbonização foi analisada em diferentes contextos, desde testes em fornos padronizados até queima em escala real de ambientes residenciais. O estudo destaca a importância da padronização das condições de ensaio e da correta medição da profundidade carbonizada para a interpretação confiável dos padrões de queima.

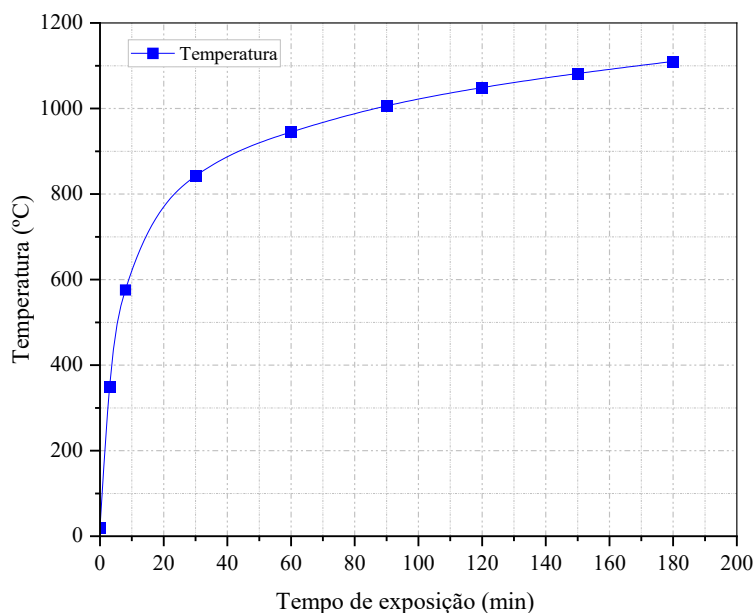
Os ensaios foram conduzidos com base nas curvas padrão de temperatura-tempo da ASTM E-119-1 e ISO 834. Essas curvas simulam o ambiente térmico de um incêndio pós-flashover, com temperaturas crescentes ao longo do tempo. Os resultados indicaram que, em condições padronizadas de exposição, a taxa média de carbonização da madeira sólida varia tipicamente entre 0,5 a 0,8 mm/min.

A taxa de carbonização não é uma constante universal. Diversos fatores interferem nesse comportamento térmico da madeira. O teor de umidade influencia negativamente a taxa, madeiras com 20% de umidade apresentaram taxas menores do que aquelas com 8%. Já a densidade, embora em alguns estudos não tenha demonstrado relação direta, em outros foi associada a uma diminuição da taxa com o aumento da massa específica. Ainda, a espessura remanescente da seção não carbonizada mostrou ter impacto, quando inferior a 50 mm a taxa de carbonização aumentava consideravelmente (Babrauskas, 2005).

Quanto à madeira de *Pinus*, estudos que realizaram ensaios segundo a curva de incêndio padrão ISO 834 (Figura 22) indicam taxas de carbonização variando entre 0,95 mm/min e 1,10 mm/min (Fernandes, 2022). Esses valores são superiores aos observados em espécies de maior densidade, cuja taxa típica situa-se em torno de 0,59 mm/min. Essa diferença de desempenho

está diretamente associada à menor densidade aparente e à maior porosidade do *Pinus*, fatores que facilitam a propagação do calor e a evolução da frente de carbonização.

Figura 22 - Curva incêndio-padrão ISO 834



Fonte: Adaptado de ISO 834.

Essas características justificam a adoção de tratamentos ignífugos, os quais têm se mostrado eficazes na redução da taxa de carbonização para valores na faixa de 0,71 a 0,72 mm/min, promovendo significativa melhora na resistência ao fogo (Fernandes, 2022).

A redução progressiva da seção transversal afeta de modo direto a capacidade resistente dos elementos estruturais, uma vez que as tensões passam a concentrar-se nas regiões ainda íntegras, resultando em aumentos dos deslocamentos e flechas, além da aceleração de mecanismos de colapso. Ensaios laboratoriais revelaram que vigas de *Pinus* colapsaram após aproximadamente 37 minutos de exposição ao fogo, enquanto vigas fabricadas com *Eucalyptus* resistiram por até 60 minutos sob as mesmas condições experimentais (Fernandes, 2022).

Martins (2016) destaca que a taxa de carbonização é definida como a velocidade com que a camada carbonizada avança para o interior da seção transversal do elemento estrutural de madeira exposto ao fogo. O estudo aponta tanto métodos experimentais quanto teóricos para avaliar o comportamento de peças de madeira lamelada colada (MLC/GLT), considerando a densidade da madeira, o teor de umidade e a ação de tratamentos preservantes. O trabalho também incorpora normas técnicas como a ASTM E-119-1, a AS 1720.4:1990 e a EN 1995-1-

2, que fornecem equações empíricas para estimativa da taxa de carbonização com base em propriedades como a densidade da madeira.

Os resultados experimentais para o *Pinus* (Figura 23), foram realizados expondo a madeira ao fogo por 32 e 40 minutos. As taxas de carbonização variaram, reduzindo ao longo do tempo devido à formação da camada de carbonização. Também foram testados tratamentos ignífugos, que reduziram a taxa de carbonização. As taxas encontradas foram superiores às previstas por normas internacionais para as coníferas, demonstrando a necessidade de considerar características específicas das espécies nacionais em análises de segurança ao fogo.

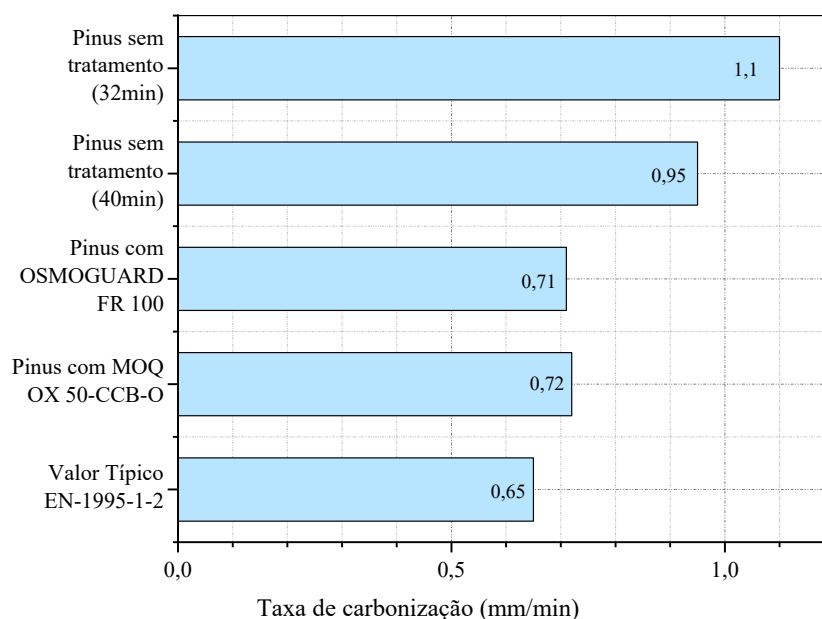
A determinação precisa da taxa de carbonização é essencial para o dimensionamento seguro de estruturas de madeira em situação de incêndio, pois esse parâmetro define diretamente a perda de seção transversal efetiva ao longo do tempo de exposição ao fogo. A camada carbonizada, embora atue como isolante térmico, representa uma região estruturalmente inativa, e seu avanço compromete a capacidade resistente dos elementos.

Considerar taxas de carbonização realistas, especialmente para espécies nacionais como o *Pinus*, permite estimar com maior rigor o tempo de resistência ao fogo e as deformações esperadas durante a exposição térmica, contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais seguros e adequados às normas de segurança. Além disso, valores baseados em ensaios experimentais brasileiros evitam o uso de parâmetros subestimados ou superestimados por normas internacionais, garantindo maior fidelidade no desempenho estrutural das edificações de madeira frente a incêndios.

No que tange as propriedades internas da madeira não carbonizadas, destaca-se a pouca quantidade de informações disponíveis a respeito das alterações nas propriedades mecânicas da madeira dessas regiões internas que não sofreram carbonização durante a exposição ao fogo. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que a temperatura no interior do elemento tende a permanecer próxima à temperatura ambiente mesmo após a formação da camada carbonizada.

Gerhards (1980) aponta que as evidências experimentais existentes indicam uma redução relativamente pequena na resistência e rigidez da madeira na porção central, sugerindo que o núcleo preserva, em grande medida, suas características estruturais mesmo sob ação térmica.

Figura 23 - Taxa de carbonização do *Pinus* sob diferentes condições.



Fonte: Adaptado de Martins (2016).

2.5.1.3 Comportamento termoestructural da madeira de *Pinus*

O comportamento termoestructural da madeira em situação de incêndio é governado pela interação entre os mecanismos de transferência de calor e a deterioração progressiva de suas propriedades físico-mecânicas. No caso específico do gênero *Pinus*, devido à sua baixa densidade e ao elevado teor de resinas, a perda de desempenho estrutural tende a ocorrer de forma mais acelerada em comparação com espécies de maior densidade. Resultados experimentais com a espécie *Pinus taeda* demonstraram reduções significativas de rigidez e resistência ao longo da exposição ao fogo, evidenciando a necessidade de precauções adicionais no dimensionamento de estruturas compostas por essa madeira (Fernandes, 2022).

À medida que a temperatura se eleva, há uma sequência de processos térmicos que impactam diretamente o desempenho estrutural da madeira. Inicialmente, ocorre a evaporação da umidade livre, geralmente a partir de 100 °C, seguida pela secagem das fibras. Por volta de 280 °C inicia-se o processo de pirólise, durante o qual os principais constituintes químicos da madeira sofrem decomposição térmica: a hemicelulose entre 200 °C e 260 °C, a celulose entre 240 °C e 350 °C, e a lignina em uma faixa mais ampla, entre 280 °C e 500 °C. Essas transformações comprometem de forma substancial o módulo de elasticidade e a resistência última à tração e compressão paralela à grã, características essenciais à estabilidade e integridade da estrutura (Pinto, 2005).

Estudos baseados na norma europeia EN 1995-1-2 (Eurocode 5), assim como investigações adaptadas ao contexto brasileiro, indicam que o módulo de elasticidade da madeira pode sofrer reduções superiores a 50% quando submetido a temperaturas acima de 300 °C. No mesmo cenário, a resistência à compressão paralela à direção das fibras pode decrescer para menos de 20% do valor original em temperaturas superiores a 400 °C (Pinto, 2005). Essas perdas substanciais de capacidade resistente resultam em aumento dos deslocamentos, intensificação de estados de flambagem e risco iminente de colapsos estruturais por flexão excessiva, sobretudo em elementos submetidos a esforços significativos.

Em elementos estruturais submetidos predominantemente à flexão, como vigas de cobertura e de piso, o efeito combinado entre a redução da seção transversal útil decorrente da carbonização e a perda do módulo de elasticidade gera deslocamentos verticais expressivos, particularmente no meio do vão. Ensaios experimentais realizados com vigas de *Pinus* submetidas à curva de incêndio padrão ISO 834 confirmam essa tendência, com observação de flechas acentuadas e colapso em tempos relativamente curtos (Fernandes, 2022). Adicionalmente, verificou-se que a taxa de carbonização é geralmente mais acentuada nas zonas tracionadas das vigas, notadamente nas faces inferiores, contribuindo para uma redução ainda mais agressiva da resistência estrutural nesses pontos críticos.

Outro fenômeno relevante observado em situações de incêndio é a curvatura térmica, caracterizada pela deformação da peça devido ao gradiente térmico entre suas faces. Embora esse efeito seja mais pronunciado em madeiras folhosas, como o *Eucalyptus spp.*, seu impacto em madeiras coníferas como o *Pinus* é limitado. A menor densidade e capacidade térmica do *Pinus* reduzem o acúmulo de tensões térmicas diferenciais, resultando em uma curvatura menos expressiva, a qual não contribui de forma significativa para o aumento da resistência residual da estrutura (Fernandes, 2022).

É importante destacar que o tempo crítico até o colapso estrutural de elementos em *Pinus* é, em geral, inferior ao verificado em elementos fabricados com madeiras de maior densidade. Esse fator impacta a classificação da resistência ao fogo dos componentes estruturais, segundo os critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico (REI), além de influenciar os parâmetros de projeto relativos ao tempo necessário para evacuação segura e combate ao incêndio. Dessa forma, o emprego de *Pinus* em estruturas de edifícios requer estratégias adicionais de segurança, como a adoção de reforços estruturais, aplicação de tratamentos retardantes de chama ou encapsulamento com materiais de proteção térmica, com vistas a aumentar a robustez da estrutura frente à ação do fogo.

2.5.1.4 Abordagens normativas para previsão do desempenho em incêndio

A previsão do desempenho de elementos estruturais de madeira em situações de incêndio é um aspecto fundamental no projeto de estruturas seguras. Diversas normas técnicas ao redor do mundo abordam esse tema, oferecendo metodologias e critérios distintos baseados em experimentações, pressupostos simplificadores e modelos empíricos. Entre as normas mais relevantes estão a EN 1995-1-2 (Eurocode 5 para as nações da comunidade européia), a AS 1720.4 (Austrália) e a NFPA 220 / NDS (Estados Unidos).

A EN 1995-1-2:2004, parte do conjunto dos Eurocódigos estruturais, fornece diretrizes para o dimensionamento de estruturas de madeira expostas ao fogo, com foco na redução da seção transversal efetiva e na degradação das propriedades mecânicas. A norma baseia-se principalmente em um modelo de seção reduzida, no qual a profundidade carbonizada é calculada por meio de uma taxa de carbonização especificada. Para elementos não protegidos, a taxa de carbonização recomendada é de 0,65 mm/min. Além disso, considera-se uma camada adicional de 7 mm, denominada "zona de carbonização adicional", com o intuito de contabilizar a degradação térmica antes da formação efetiva do carvão. A equação basilar para obtenção da seção residual é expressa por:

$$d_{efetiva} = d_{inicial} - \beta_n \cdot t - k_0 \quad (7)$$

Onde β_n é a taxa de carbonização nominal expressa em mm/min, t é o tempo de exposição ao fogo em minutos e k_0 é a profundidade da camada adicional não carbonizada (7mm por padrão normativo). Essa abordagem busca simplificar a análise estrutural ao tratar a carbonização como um fenômeno linear com avanço uniforme ao longo do tempo. A norma também apresenta coeficientes de redução para propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência à compressão, a depender da temperatura e do tipo de madeira.

A norma australiana AS 1720.4, também adota o modelo de seção reduzida, com uma concepção semelhante ao Eurocode 5, entretanto com algumas diferenças. A taxa de carbonização considerada pela AS 1720.4 varia entre 0,30 e 0,80 mm/min, dependendo da densidade da madeira. A fórmula geral utilizada na norma australiana é expressa pela [equação 8](#):

$$d_r = d_i - \beta_n \cdot t \quad (8)$$

Onde d_r é a espessura remanescente e β representa a taxa de carbonização, que pode ser determinada com base na densidade conforme a [equação 9](#):

$$\beta = \frac{300}{\rho} \quad (9)$$

Essa equação estabelece uma relação inversa entre a densidade da madeira (ρ) e sua taxa de carbonização (β), assumindo que madeiras mais densas resistem mais ao avanço térmico. Além disso, a norma AS 1720.4 inclui critérios para elementos protegidos por placas de gesso ou tintas intumescentes, tratando a proteção passiva como variável de entrada no tempo de início da carbonização.

Já a NBR 7190:2022, norma brasileira para estruturas de madeira, não apresenta em sua versão mais recente um capítulo específico para análise do desempenho em situação de incêndio. No entanto, pesquisas nacionais vêm suprimindo essa lacuna por meio da aplicação de metodologias derivadas de normas internacionais, em especial a EN 1995-1-2 e a AS 1720.4. Em alguns estudos, como os realizados por Schaffer (1967) e White (1988), adaptados ao contexto brasileiro, são propostas equações empíricas com base em testes com espécies tropicais e madeiras plantadas como o *Pinus*.

O modelo de Schaffer (1967) adota a [equação 10](#):

$$\beta = a + b \cdot \rho + c + \mu \quad (10)$$

Onde a , b e c são coeficientes empíricos ajustados para cada espécie, μ é o teor de umidade, ρ é a densidade da madeira (kg/m^3) e β a taxa de carbonização (mm/min). Esses modelos são úteis para a realidade brasileira, considerando a diversidade de espécies e as condições climáticas locais.

Nos Estados Unidos, a abordagem normativa para estruturas de madeira em situação de incêndio está incorporada principalmente à NFPA 220 e às recomendações do AWC (*American Wood Council*), especialmente por meio do NDS (*National Design Specification*). Nessa abordagem, considera-se uma taxa de carbonização padronizada de 1,6 mm/min para madeiras expostas sem proteção, além da introdução de um fator de ajuste para resistência residual denominado “*effective char depth*”, que incorpora também uma zona afetada pelo calor, semelhante ao k_0 do Eurocode. O modelo americano exprimi a [equação 11](#):

$$d_{res} = d_0 - (\beta \cdot t + a) \quad (11)$$

Onde β é a taxa de carbonização delimitada em 1,6 mm/min, a é a zona térmica de transição igual a 6,35mm e t é o tempo de exposição ao fogo. A *National Design Specification* também considera o uso de tabelas para redução de resistência com base na profundidade carbonizada e no tempo de exposição, além de prever métodos para cálculo da estabilidade global de peças de madeira lamelada colada (MLC/GLT), vigas compostas e painéis estruturais.

Comparando essas distintas abordagens, observa-se que todas as normas utilizam o modelo de seção reduzida como base conceitual, porém diferem nos valores adotados para taxa de carbonização, forma de cálculo da camada adicional degradada e critérios para proteção térmica. Enquanto o Eurocode 5 adota uma abordagem conservadora com valores fixos, a norma australiana flexibiliza conforme a densidade. Já os métodos americanos são mais pragmáticos e baseados em dados de segurança comumente utilizados na prática da engenharia nos Estados Unidos.

Outro ponto de distinção importante é o tratamento das propriedades mecânicas residuais. O Eurocode fornece tabelas com coeficientes de redução para propriedades como módulo de elasticidade e resistência à compressão e tração, com base na temperatura. Já a AS 1720.4 considera fatores de modificação simplificados. As normas americanas, por sua vez, baseiam-se em valores de carga admissível reduzidos e fatores empíricos.

Destaca-se aqui a necessidade de regionalização das análises, especialmente em países tropicais como o Brasil, onde espécies como o *Pinus* e o *Eucalipto* apresentam comportamentos térmicos distintos das madeiras testadas na Europa, América do Norte ou Oceania. A ausência de um capítulo dedicado ao fogo na NBR 7190:2022 representa uma lacuna normativa que precisa ser suprida por meio de pesquisas experimentais nacionais e adaptação criteriosa dos modelos internacionais.

A adoção de abordagens distintas entre as normas reflete as diferenças de clima, espécies florestais, tradição construtiva e filosofia de projeto. Contudo, todas as normas convergem quanto à importância da previsão da seção residual como principal estratégia para estimar o desempenho ao fogo, considerando a carbonização como o fenômeno crítico.

2.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Em termos de modelagem numérica, a ortotropia da madeira torna sua análise complexa, exigindo abordagens tridimensionais e o uso de leis constitutivas dependentes da temperatura.

Propriedades como condutividade térmica, calor específico e densidade variam durante o processo de carbonização, influenciando diretamente na propagação do calor e na velocidade de degradação mecânica da seção transversal (Frangi *et al.*, 2009).

A simulação numérica tem se consolidado como uma ferramenta indispensável na análise do comportamento mecânico de estruturas de madeira, permitindo prever o desempenho de elementos estruturais sob diferentes condições de carregamento. A precisão dessa simulação depende fortemente da escolha adequada do critério de falha, o qual define as condições em que o material perde sua capacidade resistente. Dada a anisotropia natural da madeira e suas propriedades distintas nas direções longitudinal, radial e tangencial, os critérios de falha devem ser selecionados com cautela para representar adequadamente os mecanismos de ruptura observados experimentalmente.

Sob a ótica da segurança estrutural, a madeira quando comparada ao aço, apresenta resultados comportamentais superiores quando não há proteção passiva envolvida. Isso ocorre porque o aço, ao atingir temperaturas da ordem de 600°C, perde aproximadamente 50% da sua resistência, diferente da madeira que conserva parte significativa da sua capacidade mecânica, mesmo em altas temperaturas, devido a camada carbonizada que retarda a propagação do calor (Just *et al.*, 2014). A existência dessa propriedade intrínseca da madeira, é especialmente atrativa para projeto que exijam segurança em casos de incêndio.

Estudos recentes têm explorado o uso combinado da madeira com outros materiais, como o aço, objetivando potencializar sua resistência estrutural e desempenho em incêndios. A inserção de elementos de aço no interior da madeira, desde que devidamente protegidas, pode aumentar positivamente a rigidez e resistência, se valendo da capacidade de isolamento térmico da camada carbonizada da madeira para proteger o aço contra a perda precoce de resistência (Frangi e Fontana, 2005).

Em relação a madeira, diversos critérios de falha são utilizados em sua modelagem, variando de abordagens simples, como o critério de máxima tensão e máxima deformação, até modelos mais complexos e generalizados, como os critérios de Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Hill e Puck. Os critérios simples, embora úteis para análises preliminares, não capturam adequadamente a interação entre os estados de tensão e as propriedades distintas da madeira nas diferentes direções ortotrópicas. Já os modelos generalizados, que incorporam essa anisotropia, proporcionam resultados mais compatíveis com o comportamento real dos elementos.

O critério de Hill destaca-se entre os critérios mais empregados para simular a falha em materiais ortotrópicos. Hill (1948) originalmente desenvolveu seu estudo para materiais

metálicos com comportamento anisotrópico, porém, o critério foi adaptado e amplamente utilizado na modelagem de materiais compósitos e madeira. O modelo considera a interação entre as componentes de tensão e define uma superfície de escoamento elíptica no espaço de tensões. Essa abordagem permite incorporar as diferenças de resistência da madeira nas direções principais, sendo especialmente útil na análise de carregamentos combinados.

A formulação matemática do critério de Hill é expressa por uma função de falha quadrática envolvendo as tensões principais e os parâmetros de resistência do material. Para um material ortotrópico bidimensional, a equação 12 do critério pode ser escrita como:

$$F(\sigma) = F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (12)$$

Onde σ_1 , σ_2 , σ_3 são as representações das tensões normais nas direções ortotrópicas (longitudinal, radial e tangencial), τ_{ij} são as tensões de cisalhamento nos planos correspondentes e F, G, H, L, M, N são constantes determinadas a partir dos limites de resistência em tração, compressão e cisalhamento.

O critério de Hill apresenta uma formulação matemática relativamente simples e eficiente. Essa equação é capaz de descrever uma superfície de falha compatível com o comportamento ortotrópico da madeira, desde que sejam utilizados valores apropriados de resistência em compressão, tração e cisalhamento nas três direções principais. Essa característica torna o critério especialmente atraente para simulações numéricas em programas de elementos finitos (Cabrero *et al.*, 2010).

Apesar de sua origem metálica, o critério de Hill tem se mostrado eficaz na simulação do comportamento força *versus* deslocamento de elementos estruturais de madeira. Resultados obtidos por diversos pesquisadores demonstram que a curva simulada apresenta excelente correlação com dados experimentais, tanto em relação ao limite de resistência quanto à forma da curva até a falha. Essa compatibilidade é explicada pela capacidade do modelo de representar adequadamente o início da falha devido a tensões combinadas e a distribuição interna de tensões críticas.

A literatura técnica apresenta diversos estudos que validam a aplicação do critério de Hill em simulações com madeira. Brandner e Bogensperger (2013) aplicaram o critério em modelagens de painéis CLT e observaram boa correlação com ensaios de flexão e cisalhamento. Aicher et al. (2002) utilizaram o critério de Hill para investigar a detecção de trincas longitudinais em vigas de madeira lamelada colada (CLT/GLT) utilizando métodos ultrassônicos, contribuindo para a compreensão do comportamento de ligações coladas em

estruturas de madeira. Mascia e Simoni (2013) aplicaram o critério para comparar curvas de envoltória de falha para duas espécies brasileiras de madeira com resultados experimentais. Xu et al. (2013) modela a madeira em compressão como um material elastoplástico com encruamento, utilizando o critério de escoamento de Hill. O comportamento frágil em tração e cisalhamento é modelado usando uma versão modificada do critério de Hill. Os resultados das simulações por elementos finitos mostraram boa correlação com os dados experimentais.

A aplicação extensiva do critério de Hill em diversos contextos de simulação estrutural evidencia sua robustez e versatilidade na modelagem de materiais ortotrópicos, como a madeira. Um dos aspectos mais relevantes dessa abordagem é sua capacidade de representar múltiplos modos de falha por meio de uma formulação unificada, que requer apenas o ajuste dos parâmetros de resistência específicos à espécie de madeira e às condições de carregamento. Essa característica confere ao modelo elevada adaptabilidade, permitindo sua calibração para diferentes configurações sem a necessidade de modificações estruturais na equação de falha, o que o torna especialmente atrativo em análises computacionais com elementos finitos (Mascia e Simoni, 2013).

Outro aspecto relevante na aplicação do critério de Hill é sua integração com modelos constitutivos não lineares, que permitem representar a evolução da rigidez e o processo de degradação progressiva da madeira. A simulação numérica utilizando análise não linear é fundamental para capturar fenômenos como plastificação localizada, formação de fissuras e colapso gradual da estrutura. Nesse contexto, o critério de Hill funciona como uma condição limite para o início da falha, sendo complementado por leis de dano e degradação da rigidez.

A análise não linear é especialmente importante em elementos de madeira submetidos a solicitações reais, como flexão com tração ou compressão combinada com cisalhamento. Nesses casos, o comportamento estrutural não segue uma relação linear entre carga e deslocamento, e a rigidez do elemento varia ao longo do carregamento. A utilização de modelos com critério de Hill permite incorporar essas não linearidades de forma eficiente, contribuindo para previsões mais realistas do comportamento estrutural.

Além disso, o critério de Hill é compatível com diferentes estratégias de regularização numérica, como o uso de zonas de amolecimento e técnicas de dano contínuo, que evitam a concentração excessiva de tensões e garantem estabilidade nas simulações. Essa compatibilidade é crucial para a obtenção de resultados confiáveis em análises de falha progressiva e colapso estrutural.

Ao considerar as propriedades ortotrópicas da madeira e sua resposta não linear, a simulação baseada no critério de Hill proporciona uma representação mais fiel do

comportamento físico da estrutura. Isso é especialmente útil em aplicações de segurança, como a previsão de falhas em estruturas expostas ao fogo ou reforçadas com materiais compósitos, onde as distribuições de tensão são complexas e dependentes do tempo.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Esta seção é dedicada ao embasamento teórico e científico no que delinea o comportamento de estruturas de madeira com reforço em situação ambiente e de incêndio, com especial ênfase nos estudos experimentais e numéricos para compor o lastro basilar do presente estudo.

O subitem 3.1 apresenta o mapeamento sistemático da produção científica e tecnológica da área, abrangendo artigos científicos indexados em bases de dados acadêmicas e registros de patentes depositadas. São descritas as principais bases de dados consultadas, os critérios de seleção e as palavras-chave utilizadas nas buscas. Encontrar-se-á um panorama amplo das contribuições científicas voltadas ao comportamento mecânico e térmico da madeira e às técnicas de reforço com materiais metálicos e compósitos.

No subitem 3.2, concentra-se a análise e interpretação dos resultados quantitativos e qualitativos obtidos a partir do levantamento sistemático da literatura. Detalha-se, de forma objetiva e transparente, os procedimentos metodológicos empregados no protocolo de busca e seleção dos trabalhos. Apresentam-se, ainda, resultados que proporcionam uma visão abrangente em escala global, contemplando a distribuição geográfica das publicações acadêmicas e dos depósitos de patentes. Gráficos e mapas que permitem identificar as principais tendências de pesquisa, bem como lacunas temáticas ainda existentes. As análises desenvolvidas evidenciam a crescente relevância do tema e consolidam a simulação numérica e os sistemas híbridos madeira-aço como fronteiras contemporâneas de investigação científica e tecnológica no campo das estruturas em situação de incêndio.

O subitem 3.3 busca identificar pontos de convergência e divergência entre as diferentes abordagens encontradas na literatura. Discute-se os principais modelos de previsão de carbonização, critérios de ruptura, parâmetros térmicos e estratégias de reforço estrutural. Essa seção alça compreensão às limitações técnicas e científicas existentes, justificando a pesquisa proposta. A partir dessa análise, confirma-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a interação térmica entre madeira e aço, especialmente sob condições de incêndio.

Por fim, o subitem 3.4 reúne e avalia um conjunto representativo de investigações experimentais e numéricas conduzidas por diversos autores. O texto aborda estudos clássicos e contemporâneos que exploram o desempenho de vigas de madeira reforçadas com barras de aço, fibras poliméricas e outros materiais, tanto em temperatura ambiente quanto sob ação térmica. São apresentados resultados de ensaios de flexão, curvas carga-deflexão, modos de ruptura e comparações entre dados experimentais e simulações computacionais. Esta seção

exibe o conhecimento científico produzido que tem conexões paralelas com as diretrizes metodológicas adotadas neste trabalho, evidenciando o ineditismo e a originalidade do estudo proposto para avaliar o desempenho termomecânico de vigas de madeira do gênero *Pinus* reforçadas com barras de aço em condição de incêndio.

3.1 LEVANTAMENTO DE ESTUDOS CIENTÍFICOS INTRÍNSECOS AO OBJETIVO DO TRABALHO PROPOSTO

3.1.1 Bases de dados acadêmicas

Para verificar a existência de estudos conexos ao tema, levantou-se de forma criteriosa dentro das principais bases de dados acadêmicas, artigos com escopo correspondente a fim de agrupar os estudos científicos mais relevantes. A metodologia de revisão sistemática de literatura adotada, permitiu de forma eficaz identificar e selecionar documentos de grande valor instrucional de modo estruturado. Neste presente trabalho, foram consultadas as bases presentes na [Tabela 6](#), reconhecidas por possuírem ampla cobertura e rigor na indexação de publicações científicas.

Tabela 6 - Bases de dados acadêmicas consultadas.

Qualificação	Link da Página da WEB
<i>Web of Science</i>	https://clarivate.com/webofsciencengroup/solutions/web-of-science/
<i>Scopus</i>	https://www.scopus.com/home.uri
<i>Science Direct</i>	https://sciencedirect.com/

Fonte: Próprio autor (2025).

Foi organizado um modelo progressivo baseado no protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) almejando encontrar documentos correlatos ao tema, iniciando com uma abrangência ampla e refinada gradualmente até atingir um conjunto mais específico de estudos alinhados ao objetivo da pesquisa. Para tanto, foram construídas combinações de palavras-chave (*strings* de busca), que possibilitaram o rastreamento eficiente de publicações correspondentes. Essa abordagem favorece uma triagem precisa, que garante representatividade dos artigos selecionados em relação ao escopo investigado.

Adicionalmente, estabeleceram-se critérios de inclusão e exclusão para assegurar a qualidade e a relevância dos estudos analisados. Apenas publicações de periódicos revisados por pares foram consideradas, priorizando aquelas de maior impacto acadêmico.

3.1.2 Bancos de dados de patentes

Com o objetivo de evidenciar a originalidade do presente estudo, realizou-se também uma investigação sistemática nos principais bancos de dados de patentes, apetrechando identificar possíveis registros de propriedade intelectual relacionados ao tema em questão. Diferentemente das bases de dados acadêmicas tradicionais, que se concentram majoritariamente em artigos científicos, os bancos de patentes abrigam um vasto acervo com inovações tecnológicas que não são publicados corriqueiramente em meios acadêmicos. Por esse motivo, a consulta nessas plataformas representa uma etapa importante na verificação da novidade e do ineditismo de qualquer proposta de pesquisa aplicada.

Plataformas de acesso livre, como o *Espacenet* (mantido pelo Escritório Europeu de Patentes - EPO), o *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) e o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, permitem a realização de buscas refinadas por palavras-chave, áreas tecnológicas, códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP), além de possibilitarem filtros por país, região ou tratados de cooperação como o Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT). Esses recursos oferecem uma visão abrangente do estado da técnica global, permitindo ao pesquisador verificar não apenas a existência de documentos relacionados ao tema, como também a abrangência territorial e o status jurídico das patentes. A [Tabela 7](#) traz os *links* dos bancos de patentes pesquisados para esse estudo.

Tabela 7 - Banco de dados de propriedades intelectuais consultadas.

Banco de Patentes	Link da Página da WEB
<i>Espacenet</i> - Latipat (pt ¹)	https://lp.espacenet.com/advancedSearch?locale=pt_LP
<i>Espacenet</i> - Latipat (es ²)	https://lp.espacenet.com/advancedSearch?locale=es_LP
<i>Espacenet</i> - Worldwide	https://worldwide.espacenet.com/
<i>Patentscope</i> - WIPO	https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf
USPTO	https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/

Fonte: Próprio autor (2025).

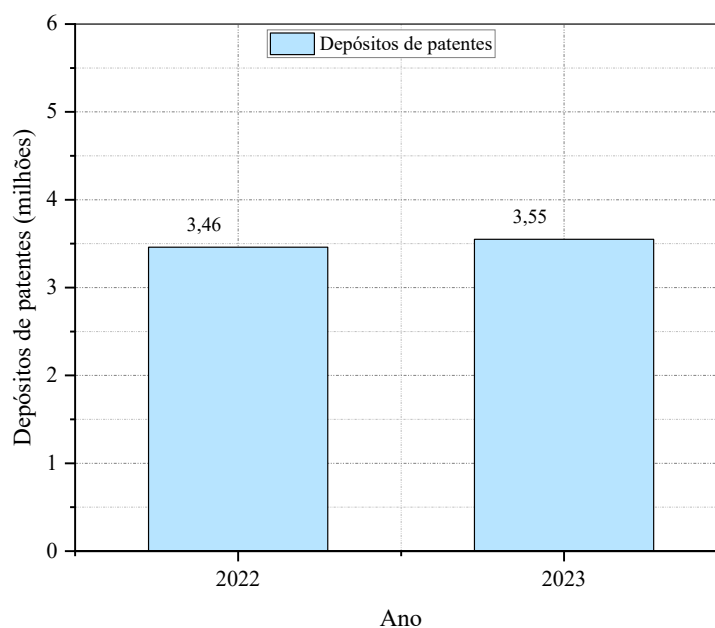
Nota: ¹ Português; ² Espanhol.

A plataforma *Espacenet*, mantida pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO), oferece acesso gratuito de milhões de documentos de patentes oriundos de mais de 100 jurisdições,

incluindo países de língua portuguesa como o Brasil (abrangendo os documentos depositados no INPI) e espanhola. Essa característica torna a ferramenta especialmente útil para pesquisas que envolvam inovações registradas na América Latina, na Península Ibérica e em outras regiões lusófonas e hispano falantes. Para explorar adequadamente essas bases, como estratégia, a busca por meio de *strings* foi adaptada para os idiomas relevantes. Nesse sentido, as *strings* originalmente formuladas em inglês foram devidamente traduzidas e aplicadas em português e espanhol, de modo a garantir uma varredura linguística mais ampla e precisa.

De forma complementar, a plataforma *Espacenet* disponibiliza a funcionalidade *Worldwide*, que expande a cobertura da busca para documentos internacionais, incluindo aqueles depositados por meio do Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT). Essa opção possibilita o acesso a registros em múltiplos idiomas e de diferentes origens jurisdicionais. Dentro do contexto da abrangência internacional, destaca-se o *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), que concentra o maior número de patentes ativas do mundo e atua como uma referência global para depósitos internacionais, dada sua integração com o sistema PCT e a forte influência tecnológica dos Estados Unidos. A utilização conjunta do *Espacenet* e do USPTO permite ao pesquisador alcançar uma cobertura robusta, tanto em termos geográficos quanto técnicos, fortalecendo a análise do estado da técnica em escala global.

Figura 24 - Número de depósitos de patentes.



Fonte: Adaptado de Organização Mundial da Propriedade Intelectual - OMPI (2024).

De acordo com a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI, 2024), o número de depósitos de patentes em áreas técnico-científicas cresceu 2,7% do ano de 2022 para 2023, superando a marca de 3,46 milhões de depósitos globais em 2022, conforme demonstrados na [Figura 24](#). Esse cenário reforça a importância de integrar a análise de patentes no processo de revisão sistemática, sobretudo em pesquisas voltadas à inovação tecnológica e à aplicação prática. Ignorar essa fonte de informação pode levar à duplicação de esforços ou até mesmo à infração de direitos legais já estabelecidos.

3.1.3 *Strings* de busca

Para assegurar o rigor e a relevância da revisão de literatura, foram definidos critérios específicos para as buscas bibliográficas ([Tabela 8](#)). O principal parâmetro adotado foi a padronização do idioma das publicações, restringindo-se a artigos em inglês. Essa escolha se justifica por ser a língua predominante na literatura científica internacional, além de facilitar o acesso às bases de dados da [Tabela 6](#) e assegurar maior comparabilidade documental.

Entretanto, esse mesmo critério não se aplica integralmente às buscas em bancos de patentes, uma vez que pedidos de propriedade intelectual são, nas iniciais, redigidos na língua oficial do país onde são depositados. Tornou-se necessário então adaptar a estratégia de busca para incluir palavras-chave e termos técnicos também em português e espanhol, além do inglês. Essa abordagem linguística ampliada foi essencial para cobrir adequadamente documentos depositados em regiões como América Latina e Península Ibérica, que apresentam atividade relevante em inovações tecnológicas dentro do escopo do presente estudo.

Tabela 8 - Principais critérios de inclusão e exclusão.

Critérios	
Inclusão	Exclusão
Estudos que abordam a resistência ao fogo de vigas de madeira	Trabalhos que não abordam nenhum tipo de reforço (fibra de carbono, polímeros, etc.)
Trabalhos que incluem reforço de vigas de madeira com aço	Artigos que não apresentam dados quantitativos ou modelagens confiáveis
Artigos com análises numéricas e/ou experimentais sobre o tema	Pesquisas sobre outros tipos de estruturas (paredes, pilares, lajes, etc.)
Pesquisas que analisam o tempo de resistência ao fogo em vigas de madeira	Publicações com relevância limitada
Publicações em periódicos reconhecidos na área de ciências exatas	Publicações que não relacionadas a área de ciências exatas

Fonte: Próprio autor (2025).

Além disso, a ampliação do escopo linguístico nas buscas por patentes reflete a preocupação com a exaustividade dos resultados e uma adequação metodológica ao funcionamento dos sistemas internacionais de propriedade intelectual. A busca nesses idiomas (inglês, espanhol e português) possibilitou um rastreamento mais eficaz de tecnologias relacionadas ao tema em plataformas como *Espacenet* e USPTO, respeitando as especificidades linguísticas de cada jurisdição. Essa estratégia assegura uma análise mais abrangente do estado da técnica e reforça o compromisso do estudo com a identificação de possíveis sobreposições com tecnologias previamente registradas.

Nenhuma limitação temporal foi imposta à seleção de publicações indexadas nas plataformas acadêmicas ou nos bancos de dados de propriedade intelectual. Essa decisão metodológica teve como objetivo contemplar tanto os estudos e patentes fundacionais, que definem os marcos iniciais do desenvolvimento técnico-científico, quanto trabalhos mais recentes, que refletem avanços contemporâneos na área. Essa abordagem garantiu a visualização da evolução temática, permitindo o mapeamento histórico do conhecimento e a identificação de tendências emergentes. A amplitude temporal contribuiu, portanto, para a representatividade e contextualização dos dados coletados.

Tabela 9 - Estruturação das *strings* em inglês para busca nas bases acadêmicas e patentárias.

Amplitude	String
<i>String 1</i>	("wooden beams" OR "wood structures") AND ("fire" OR "thermal behavior") AND ("steel" OR "metallic bars") NOT concrete
<i>String 2</i>	("experimental analysis" OR "numerical analysis") AND "steel bars" AND ("timber beams" OR "timber structures")
<i>String 3</i>	("wood structures" OR "wooden beams") AND ("fire" OR "fire resistance") AND ("reinforcement" OR "reinforced structures") NOT concrete
<i>String 4</i>	("numerical analysis" OR "computational modeling") AND ("wooden beams" OR "wood structures") AND ("fire safety" OR "fire resistance") NOT concrete
<i>String 5</i>	("experimental analysis" OR "numerical analysis") AND "steel bars" AND ("timber beams" OR "timber structures") AND (fire OR "fire resistance") NOT concrete

Fonte: Próprio autor (2025).

Com os critérios de seleção e os campos de busca devidamente estabelecidos, a formulação das *strings* seguiu uma abordagem estruturada em múltiplas etapas. Inicialmente, realizou-se uma busca exploratória ampla, voltada para a identificação de palavras-chave recorrentes, classificações técnicas, possíveis sinônimos e/ou variações linguísticas. Posteriormente, promoveu-se um refinamento progressivo das combinações, com o objetivo de restringir o escopo aos documentos mais alinhados aos objetivos do estudo. A [Tabela 9](#) e a

Tabela 10 apresentam a organização sistemática das palavras-chave utilizadas em cada plataforma, assim como os operadores gerais utilizados para a construção das expressões de busca nos três idiomas considerados: inglês, espanhol e português.

Tabela 10 - Estruturação das *strings* em espanhol e português para busca nas bases patentárias.

Amplitude	Idioma	String
String 1	Espanhol	("vigas de madera" OR "estructuras de madera") AND ("fuego" OR "comportamiento térmico") AND ("acero" OR "barras metálicas") NOT concreto
	Português	("vigas de madeira" OR "estruturas de madeira") AND ("fogo" OR "comportamento térmico") AND ("aço" OR "barras metálicas") NOT concreto
String 2	Espanhol	("análisis experimental" OR "análisis numérico") AND "barras de acero" AND ("vigas de madera" OR "estructuras de madera")
	Português	("análise experimental" OR "análise numérica") AND "barras de aço" AND ("vigas de madeira" OR "estruturas de madeira")
String 3	Espanhol	("estructuras de madera" OR "vigas de madera") AND ("fuego" OR "resistencia al fuego") AND ("refuerzo" OR "estructuras reforzadas") NOT concreto
	Português	("estruturas de madeira" OR "vigas de madeira") AND ("fogo" OR "resistência ao fogo") AND ("reforço" OR "estruturas reforçadas") NOT concreto
String 4	Espanhol	("análisis numérico" OR "modelado computacional") AND ("vigas de madera" OR "estructuras de madera") AND ("seguridad contra incendios" OR "resistencia al fuego") NOT concreto
	Português	("análise numérica" OR "modelagem computacional") AND ("vigas de madeira" OR "estruturas de madeira") AND ("segurança contra fogo" OR "resistência ao fogo") NOT concreto
String 5	Espanhol	("análisis experimental" OR "análisis numérico") AND "barras de acero" AND ("vigas de madera" OR "estructuras de madera") AND ("fuego" OR "resistencia al fuego") NOT concreto
	Português	("análise experimental" OR "análise numérica") AND "barras de aço" AND ("vigas de madeira" OR "estruturas de madeira") AND ("fogo" OR "resistência ao fogo") NOT concreto

Fonte: Próprio autor (2025).

Referente à aplicação das estratégias de busca, optou-se pela utilização dos campos de título e resumo em todas as plataformas consultadas, tanto acadêmicas quanto de patentes. Essa delimitação visou otimizar a precisão das buscas e assegurar a relevância dos resultados, evitando ruídos decorrentes de buscas em textos integrais, onde, por vezes, incluem-se conteúdos periféricos ou de baixa aderência ao escopo da pesquisa. Dessa forma, as *strings* de busca foram aplicadas de maneira a garantir eficiência na recuperação dos documentos de maior relevância e pertinência.

3.1.4 Sintaxes de entrada das plataformas

Cada plataforma em sua ferramenta de busca possui sua própria lógica de processamento e restrições sintáticas quanto à utilização de operadores booleanos, os quais devem ser aplicados conforme os padrões definidos por cada plataforma. No caso específico das bases de dados de patentes, muitas ferramentas permitem, além do uso de operadores lógicos, a definição de prefixos ou campos específicos, como título (TI), resumo (AB), reivindicações (CLMS) ou descrição completa (SPEC), para refinar a localização dos termos pesquisados. Esse recurso contribui para buscas mais direcionadas e precisas dentro de documentos extensos e tecnicamente densos.

Para esse estudo, foram utilizados exclusivamente os operadores booleanos, devidamente adaptados à estrutura de entrada (*input*) de cada interface de busca, conforme os requisitos sintáticos e operacionais de cada plataforma analisada. A padronização das *strings* respeitou a lógica interna de cada sistema, para garantir a compatibilidade dos resultados e a replicabilidade da metodologia. A [Tabela 11](#) traz os operadores empregados conforme as especificidades de cada plataforma consultada.

Tabela 11 - Sintaxes de entrada dos principais operadores booleanos em cada plataforma.

Sintaxe de operação em cada plataforma								
Operador booleano	Web Of Science	Scopus	Science Direct	Espacenet Latipat (pt)	Espacenet Latipat (es)	Espacenet Worldwide	Patentscop WIPO	USPTO
AND	AND	AND	AND	AND	AND	ALL	AND	AND
OR	OR	OR	OR	OR	OR	ANY	OR	OR
NOT	NOT	AND NOT	NOT	NOT	NOT	NOT	NOT	NOT
NEAR/x	NEAR/x	W/n	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹
SAME	SAME	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹	Cmd não rec. ¹
Aspas “ ”	“ ”	“ ”	“ ”	“ ”	“ ”	“ ”	“ ”	“ ”
Asterisco *	*	*	*	*	*	*	*	*
Interrog. ?	?	?	?	?	?	?	?	?
Parent. ()	()	()	()	()	()	()	()	()

Fonte: Próprio autor (2025).

Nota: ¹Comando não reconhecido.

3.1.5 Apresentação dos resultados de pesquisa

Após as buscas nas plataformas acadêmicas e de depósitos de patentes conforme os níveis de *strings* (amplitudes) destacadas nas [Tabela 9](#) e [Tabela 10](#), os resultados de pesquisa foram extraídos e devidamente tratados em Excel e posteriormente lançados no programa Origin, para elaboração dos gráficos, objetivando conferir adequada representação das métricas pertinentes à demonstração e discussão.

A sequência de dados apresentados a seguir representa a volumetria de artigos indexados nas plataformas acadêmicas apresentadas na [Tabela 6](#) e de patentes depositadas nas plataformas da [Tabela 7](#), encontrados conforme aplicação das *strings* para cada amplitude de pesquisa. Foram extraídos dados para representatividade numérica de cada plataforma em função dos dados pesquisados, dados de autoria e produção científica, representação das principais áreas consideradas como foco de pesquisa e linha temporal dos documentos publicados. Essas métricas são importantes e permitem uma análise em cada nível de amplitude da [Tabela 5](#), evidenciando a existência de lacunas do conhecimento dentro do foco de trabalho.

3.2 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS E BIBLIOGRÁFICAS

3.2.1 Análise dos dados bibliométricos

Após identificação dos documentos, iniciou-se a etapa de filtragem seguindo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). A [Figura 25](#) apresenta o fluxograma do processo, mostrando as etapas de exclusão e seleção dos arquivos possibilitando uma visão abrangente das decisões tomadas e dos critérios adotados em cada fase.

A adoção do protocolo PRISMA impõe rigor metodológico, garante reprodutibilidade, além de eliminar duplicatas e permitir avaliar a relevância e qualidade dos estudos incluídos na revisão. Essa metodologia contribui para a construção de uma base de dados consistente, possibilitando uma análise mais confiável e fundamentada.

O primeiro processo após a identificação à que os documentos (artigos e patentes) foram submetidos foi a triagem. Nessa etapa todos os documentos foram avaliados com a finalidade de eliminar possíveis duplicatas. Foram identificados 27 artigos acadêmicos e 143 depósitos de patentes duplicados que foram devidamente excluídos do processo.

Após a eliminação dos artigos e patentes duplicados, iniciou-se a etapa de elegibilidade que consistiu na leitura dos títulos dos artigos para exclusão dos documentos que não estavam alinhados com o foco do estudo proposto. Posteriormente, procedeu-se a leitura nos resumos para classificar aqueles com aderência ao tema e excluir àqueles que não se enquadraram ao escopo alvitrado. Após a terceira etapa, procedeu-se com uma leitura superficial, para exclusão de artigos em que seu conteúdo não possuía compatibilidade com o foco desse estudo. Findadas as exclusões, os demais artigos compuseram o tema de leitura aprofundada para balizar esse estudo.

Os resultados bibliométricos referentes às *strings* são apresentados em gráficos, conforme a estrutura descrita nas [Tabela 9](#) e [Tabela 10](#). Em termos numéricos, a plataforma de trabalhos acadêmicos Science Direct converteu resultados mais expressivos. No caso das plataformas de depósitos de patentes, a *Espacenet-worldwide* converteu o maior número de documentos, seguido pela base de dados da USPTO, conforme demonstrado na [Tabela 12](#).

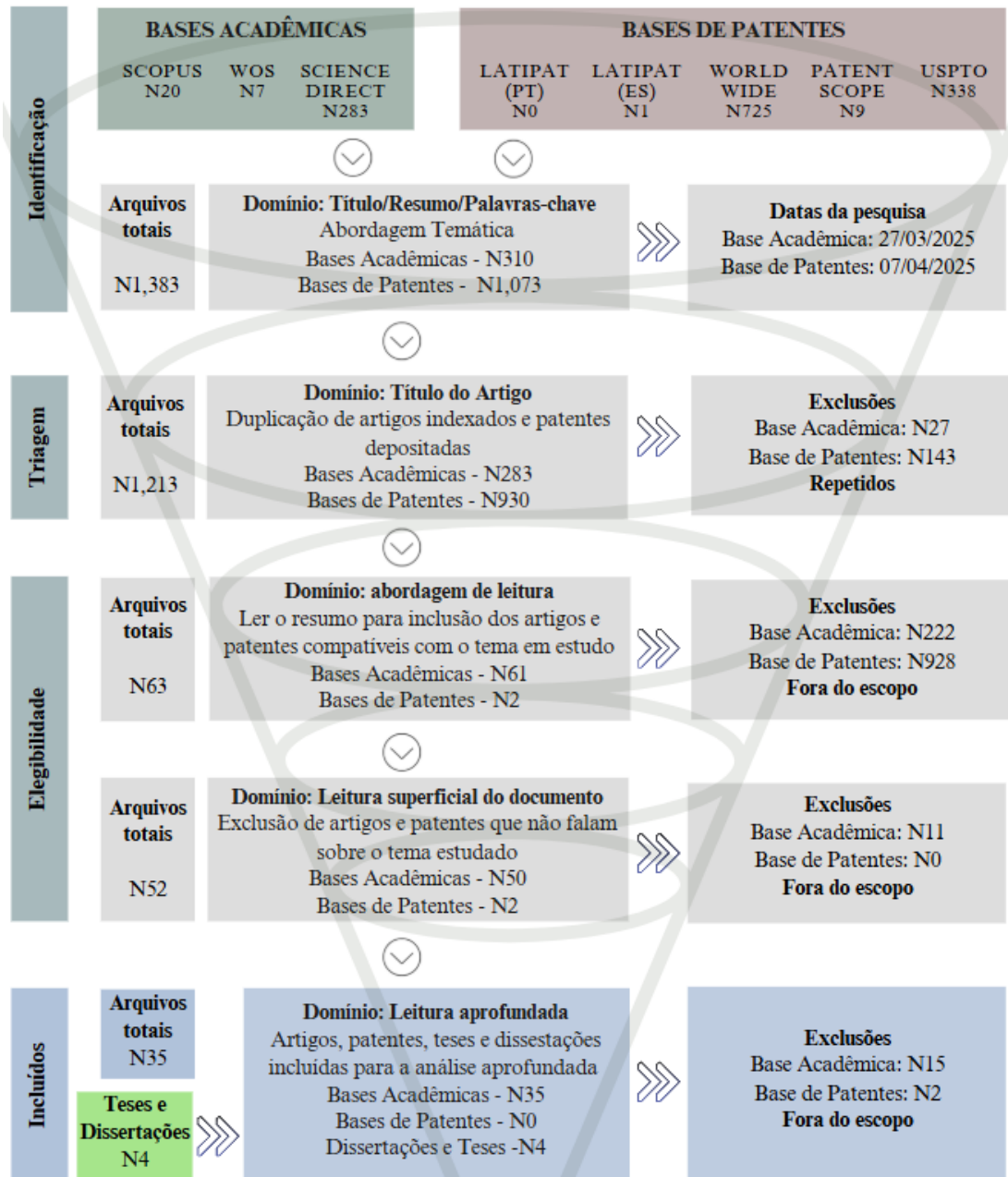
Sem exceção, em todas as faixas de *strings*, a plataforma da *Science Direct* apresentou um número de artigos superior numericamente aos resultados apresentados pela plataforma da *Web of Science* e *Scopus*. A partir das *strings* compostas para o estudo, pôde-se chegar a um número de artigos limitado na faixa da *string 5* sobre o tema abordado por esse estudo. Com o refinamento da pesquisa, houve uma redução no número de publicações, como esperado em uma busca mais direcionada. Dado que apenas um artigo correlativo ao tema foi identificado, tornou-se necessário analisar artigos de outras faixas de *strings* para verificar possíveis correspondências e avaliar sua adequação para composição basilar desse estudo.

A análise dos documentos remanescentes após o processo de filtragem permitiu não apenas consolidar informações diretamente relacionadas ao tema central, mas também identificar lacunas de pesquisa que poderão ser exploradas nas etapas seguintes deste trabalho. Embora o número de artigos estritamente aderentes tenha se mostrado muito limitado, os materiais correlatos selecionados oferecem subsídios valiosos para contextualizar o estudo, fornecer dados comparativos e embasar a metodologia proposta, especialmente no que se refere às propriedades físico-mecânicas da madeira, ao comportamento térmico de sistemas híbridos e às práticas de reforço estrutural com barras metálicas.

Dessa forma, o processo sistemático de revisão empreendido assegura que a base teórica construída seja robusta e fundamentada em evidências científicas relevantes, ainda que provenientes de diferentes vertentes temáticas. Os próximos passos da pesquisa consistiram em aprofundar a análise dos artigos selecionados, correlacionar os resultados obtidos às particularidades do objeto de estudo e delinear, de forma precisa, as premissas que nortearão a

modelagem numérica e a análise paramétrica previstas para o desenvolvimento completo deste trabalho.

Figura 25 - Protocolo PRISMA e etapas de identificação e filtragem de estudos científicos: abordagem sobre a temática do estudo proposto.



Fonte: Próprio autor (2025).

Os resultados expressados para as buscas nas plataformas de bases de patentes, mostram que a base de dados da *Espacenet-worldwide* retornou 725 documentos, que representa um valor 215% maior que as patentes depositadas na USPTO que detém as solicitações de patentes presentes nos Estados Unidos da América. Nas demais bases de depósitos, a quantidade de

arquivos encontrados foi baixa, demonstrando uma predominância de solicitações de depósitos na área em estudo em países de língua inglesa. A [Tabela 121](#) apresenta o resultado tanto de artigos como de patentes encontradas para cada *string* construída para este trabalho.

Tabela 12 - Resultados volumétricos de documentos acadêmicos e patentes.

Bases	Plataforma	String 1	String 2	String 3	String 4	String 5
Acadêmicas	<i>Scopus</i>	7	4	6	3	0
	<i>WOS</i>	0	3	2	2	0
	<i>Science Direct</i>	115	109	47	6	6
Patentes	<i>Latipat (pt)</i>	0	0	0	0	0
	<i>Latipat (es)</i>	1	0	0	0	0
	<i>Worldwide</i>	530	1	194	0	0
	<i>Patentscope</i>	7	0	2	0	0
	USPTO	254	0	84	0	0

Fonte: Adaptado das plataformas acadêmicas: *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*; Plataformas de patentes: *Spacenet*, *Patentscope*; USPT.

Em termos de representatividade por base de dados dos resultados encontrados sobre o total de documentos identificados nas buscas realizadas, a [Tabela 13](#) apresenta os valores em porcentagem calculados para cada plataforma versus *strings* utilizadas.

Tabela 13 - Representatividade numérica em porcentagem por base de dados versus *strings*.

Bases	Plataforma	String 1	String 2	String 3	String 4	String 5
Acadêmicas	<i>Scopus</i>	5.74%	3.45%	10.91%	27.27%	0.00%
	<i>WOS</i>	0.00%	2.59%	3.64%	18.18%	0.00%
	<i>Science Direct</i>	94.26%	93.97%	85.45%	54.55%	100.00%
Patentes	<i>Latipat (pt)</i>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	<i>Latipat (es)</i>	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	<i>Worldwide</i>	66.92%	100.00%	69.29%	0.00%	0.00%
	<i>Patentscope</i>	0.88%	0.00%	0.71%	0.00%	0.00%
	USPTO	32.07%	0.00%	30.00%	0.00%	0.00%

Fonte: Adaptado das plataformas acadêmicas: *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct*; Plataformas de patentes: *Spacenet*, *Patentscope*; USPT.

Devido à baixa conversão de resultados pela *string* 5, os gráficos apresentados pretendem dar uma visão ampla dos dados, considerando as 5 amplitudes. A evolução quantitativa das publicações indexadas e de patentes depositadas nas bases de dados acadêmicas e de patentes respectivamente, estão representados nos gráficos da [Figura 26](#) e [Figura 27](#) respectivamente.

Ao observar a distribuição temporal, nota-se que até o final da década de 1990, a quantidade de publicações indexadas nas bases acadêmicas era extremamente reduzida. A partir dos anos 2000, houve um crescimento gradual na produção científica, indicando uma intensificação do interesse acadêmico na temática associada.

O crescimento torna-se mais acentuado após 2010, com um aumento consistente no número de artigos publicados, principalmente na Science Direct, que sugere uma tendência de consolidação da área como campo relevante de pesquisa científica. Esse comportamento tem provável relação com a evolução tecnológica, aumento na preocupação com a segurança estrutural, uso de novos materiais compósitos e maior exigência por regulamentações técnicas no setor de construção.

O pico mais notável ocorre em 2024, com um número expressivamente superior de publicações em comparação com anos anteriores, ultrapassando 25 artigos indexados. Pode-se atribuir esse crescimento à fatores como avanços metodológicos, ampliação de grupos de pesquisa dedicados ao tema ou ainda o aumento do interesse em soluções sustentáveis e seguras no setor da construção civil, incluindo o uso de madeira reforçada e comportamento ao fogo de estruturas híbridas.

A [Figura 26](#) traz essa significativa evolução na quantidade de publicações ao longo das últimas duas décadas, indicando que a área vem se destacando na comunidade científica. O predomínio da base Science Direct ao longo do período também indica uma maior afinidade dos periódicos dessa base com os temas pesquisados.

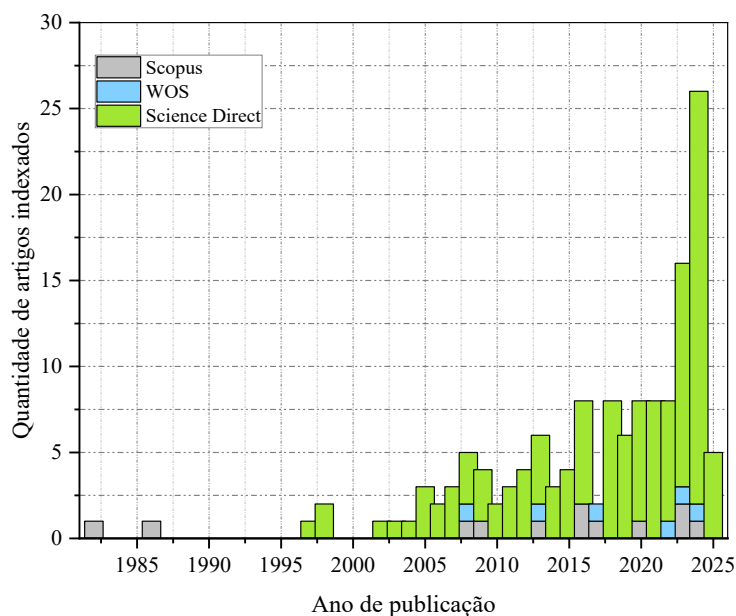
Em termos dos resultados encontrados nas bases de patentes ([Figura 27](#)), observa-se que até a década de 1960 os registros de patentes eram esparsos e em quantidade reduzida, independentemente da base consultada. A partir de 1980, há um crescimento gradual, com destaque para o período após o ano 2000, onde inicia-se uma escalada significativa no número de depósitos. Esse crescimento atinge seu pico entre 2015 e 2020, quando a quantidade total anual chega a ultrapassar 60 patentes depositadas em 2017.

Esse comportamento denota uma intensificação pela proteção de propriedade intelectual nas últimas décadas, associada ao avanço tecnológico e à globalização. A predominância da base *Worldwide* indica a busca por alcance internacional nas proteções, enquanto as demais bases complementam esse cenário com informações específicas de jurisdições ou idiomas distintos.

A partir da análise conjunta dos gráficos apresentados nas [Figuras 26 e 27](#), observa-se, de forma intuitiva, que o aumento no número de publicações científicas e de patentes depositadas ocorre no mesmo período temporal. Embora não haja correlação direta entre os

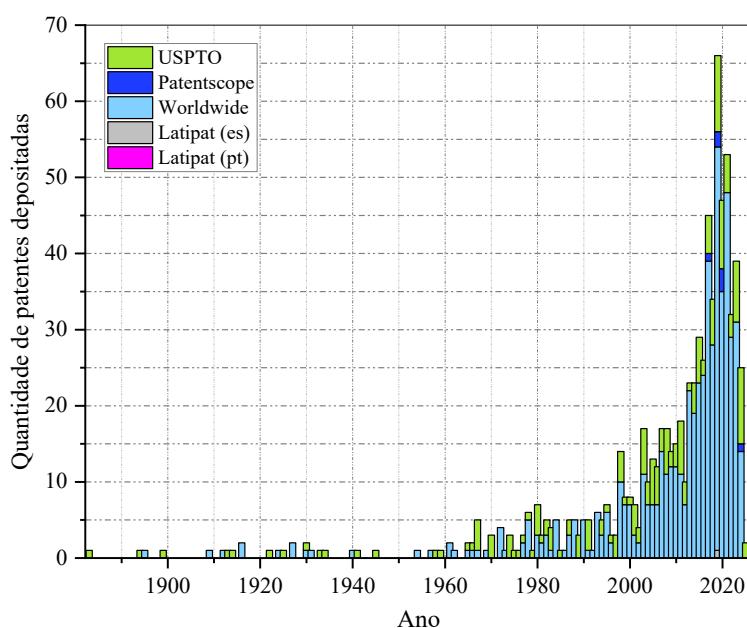
dois conjuntos de dados, é possível inferir que o movimento global em direção ao desenvolvimento e adoção de produtos ecossustentáveis tem influenciado de maneira concomitante, tanto o meio acadêmico quanto o setor produtivo da construção civil.

Figura 26 - Volumetria de publicações: Levantamento de artigos indexados.



Fonte: Adaptado das plataformas: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*.

Figura 27 - Volumetria de publicações: Levantamento de depósitos de patentes.

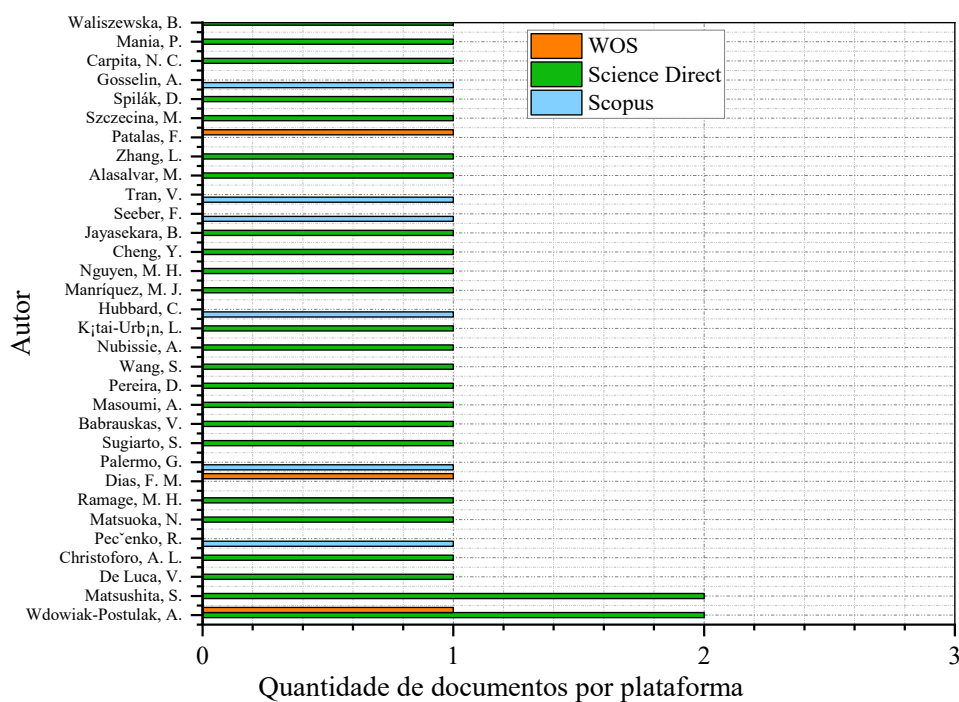


Fonte: Adaptado das plataformas: *USPTO*, *Patentscope*, *Worldwide* e *Spacenet*.

Outro aspecto relevante a ser observado é a diversidade de fontes acessíveis para a consolidação dos dados apresentados. Para este trabalho foram consultadas 5 bases, entretanto a diversificação de bases como a USPTO, *Patentscope* e *Latipat* permite uma a realização de um levantamento abrangente e representativo, considerando documentos depositados tanto em órgãos nacionais quanto internacionais. Essa abordagem permite identificar tendências tecnológicas emergentes em nível global e diferentes regiões. Além disso, a presença de múltiplas bases assegura a mitigação de possíveis vieses geográficos ou linguísticos, capaz de nortear uma visão fiel da evolução da atividade inventiva em uma linha temporal completa. Essa abordagem é essencial para compreender não apenas a volumetria de depósitos, mas também a dispersão geográfica da produção de conhecimento tecnológico patentado.

Durante a etapa de levantamento e sistematização dos dados pertinentes a este trabalho, 35 artigos indexados foram selecionados para compor o lastro documental para a revisão bibliográfica desse estudo. A [Figura 28](#) ilustra o primeiro autor de cada artigo e a plataforma de publicação, *Scopus*, *Science Direct* ou *Web of Science*, e a quantidade de trabalhos publicados em cada periódico referente aos trabalhos selecionados, evidenciando a participação de distintos pesquisadores no desenvolvimento da temática investigada.

Figura 28 - Volumetria de publicações por autor dos artigos da composição basilar da proposta temática.

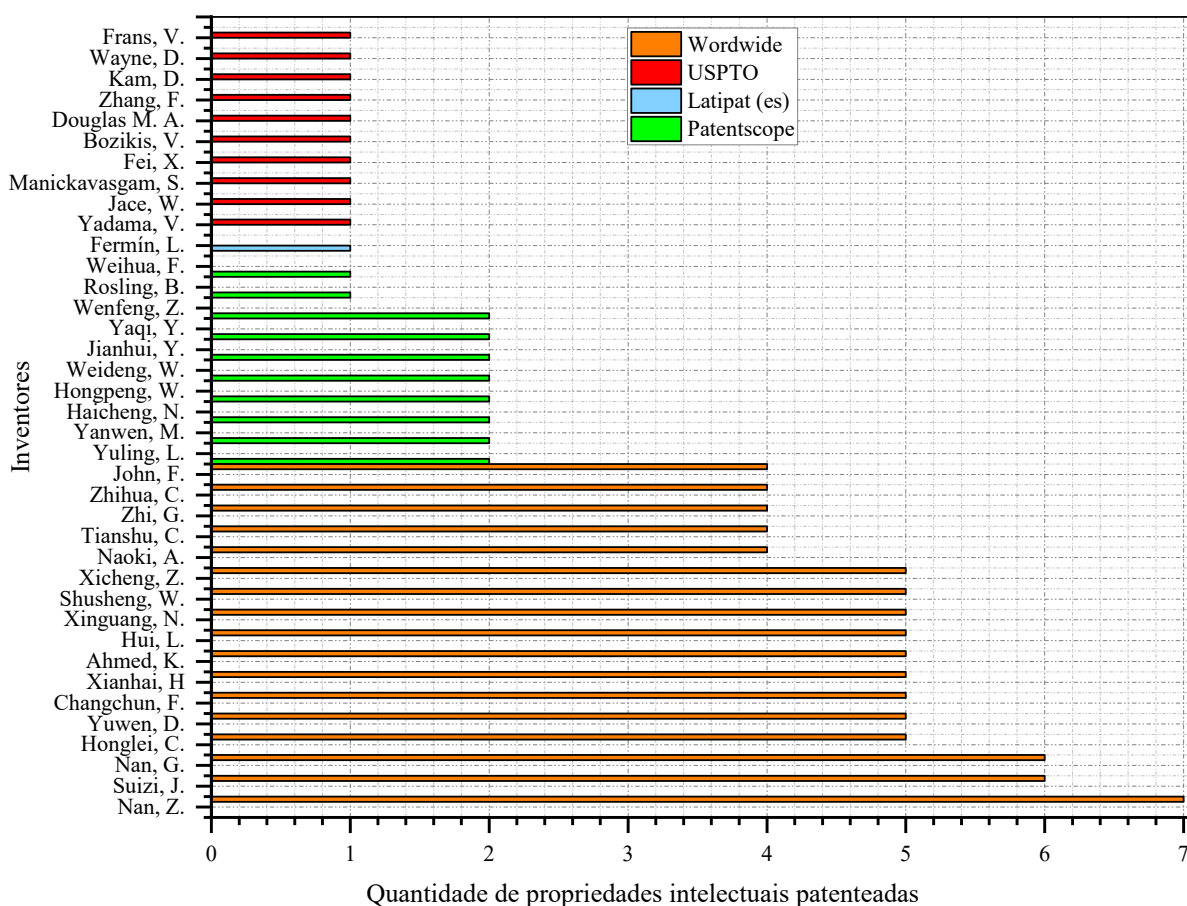


Fonte: Adaptado das plataformas: Scopus, Web of Science e Science Direct.

Para o caso das patentes, onde não houve seleção de documentos para compor o lastro basilar, devido a não correspondência de documentos com o assunto em pauta, a [Figura 29](#) dispõe o nome dos 10 depositantes com maior número de solicitações de cada plataforma consultada, rastreados conforme *strings* da [Tabela 9](#) e utilizadas na tentativa de encontrar possíveis documentos com conteúdo correlato ao campo de estudo abordado nesse trabalho.

Apesar de não terem sido incorporadas ao corpo principal da pesquisa, as informações extraídas durante o processo de busca por patentes mostram dados relevantes sobre os agentes ativos na área de interesse. A análise dos depositantes mais recorrentes possibilitou identificar os principais centros de inovação tecnológica com atuação próxima ao tema, ainda que os conteúdos das patentes localizadas não apresentassem aderência direta aos objetivos específicos deste trabalho. Esses documentos contribuem para o mapeamento do panorama tecnológico e reforçam a importância de ampliar as estratégias de busca em futuras investigações e permitem afirmar que o estudo proposto desse trabalho possui originalidade e ineditismo.

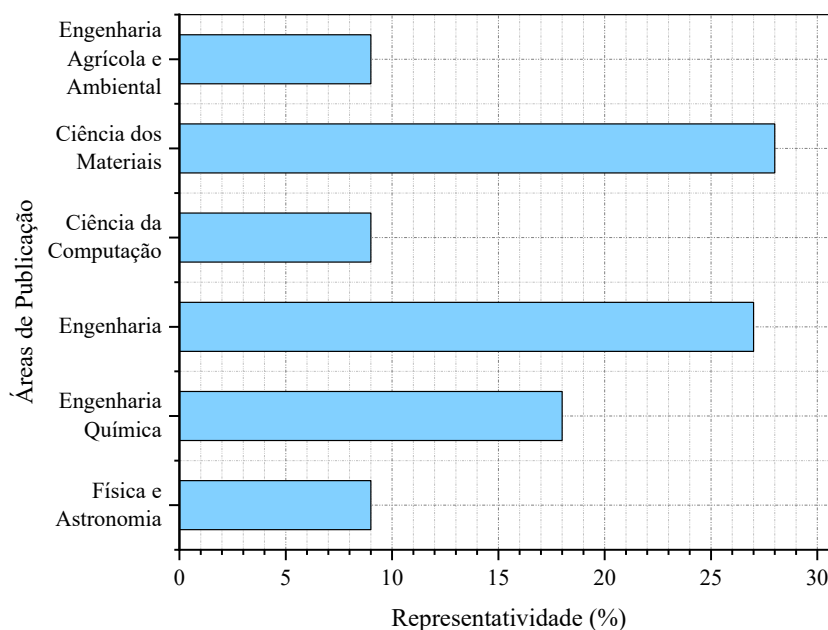
Figura 29 - Principais inventores por base de patentes.



Fonte: Adaptado das plataformas: USPTO, Patentscope, Wordwide e Spacenet.

Devido às limitações de filtro impostas para a pesquisa, restringindo-se apenas a artigos na área das ciências exatas, a distribuição dos artigos encontrados, considerando a somatória das plataformas *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, é apresentada na [Figura 30](#) que traz a distribuição da representatividade por área do conhecimento. Para os artigos encontrados, onde percebe-se a predominância do assunto nas áreas de engenharia e ciência dos materiais.

Figura 30 - Volumetria de publicações por área do conhecimento.

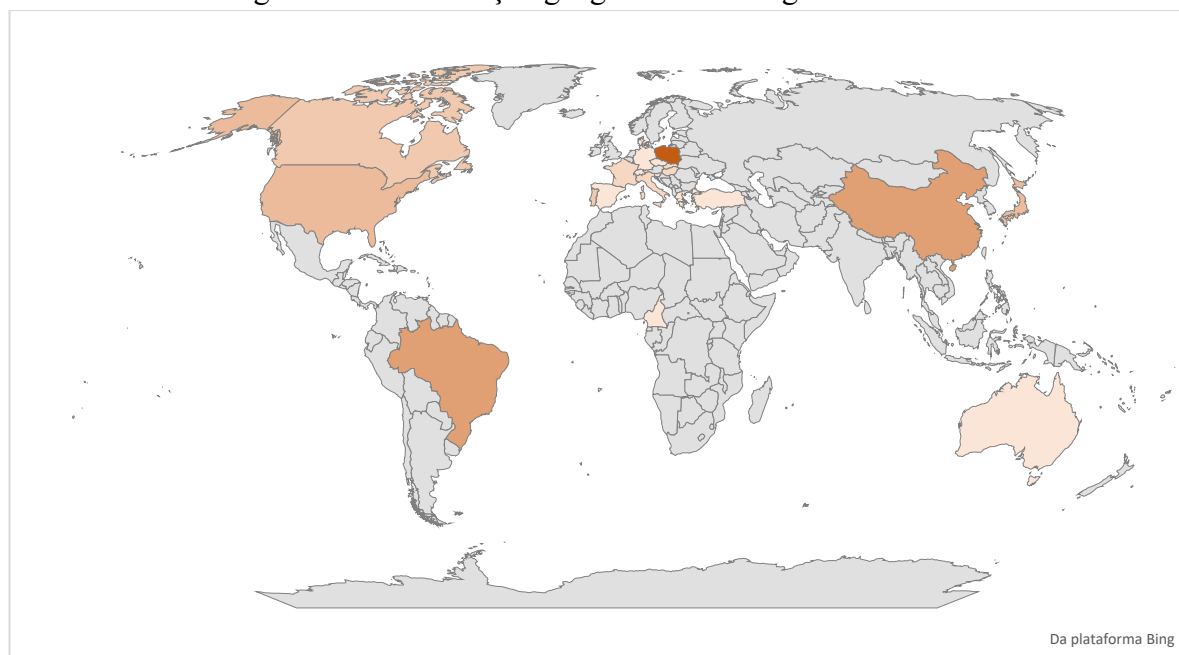


Fonte: Adaptado das plataformas: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*.

Em termos de distribuição geográfica das publicações selecionadas para compor o lastro desse estudo, a [Figura 31](#) revela uma concentração significativa de estudos oriundos da Polônia, com um total de 11 trabalhos, seguida pela China e pelo Brasil, com 6 publicações cada. Ressalte-se, todavia, a abrangência internacional da produção científica sobre o tema, com contribuições de diversos países. Nesse contexto, destaca-se Camarões como o único representante do continente africano a apresentar estudos relacionados à temática em questão.

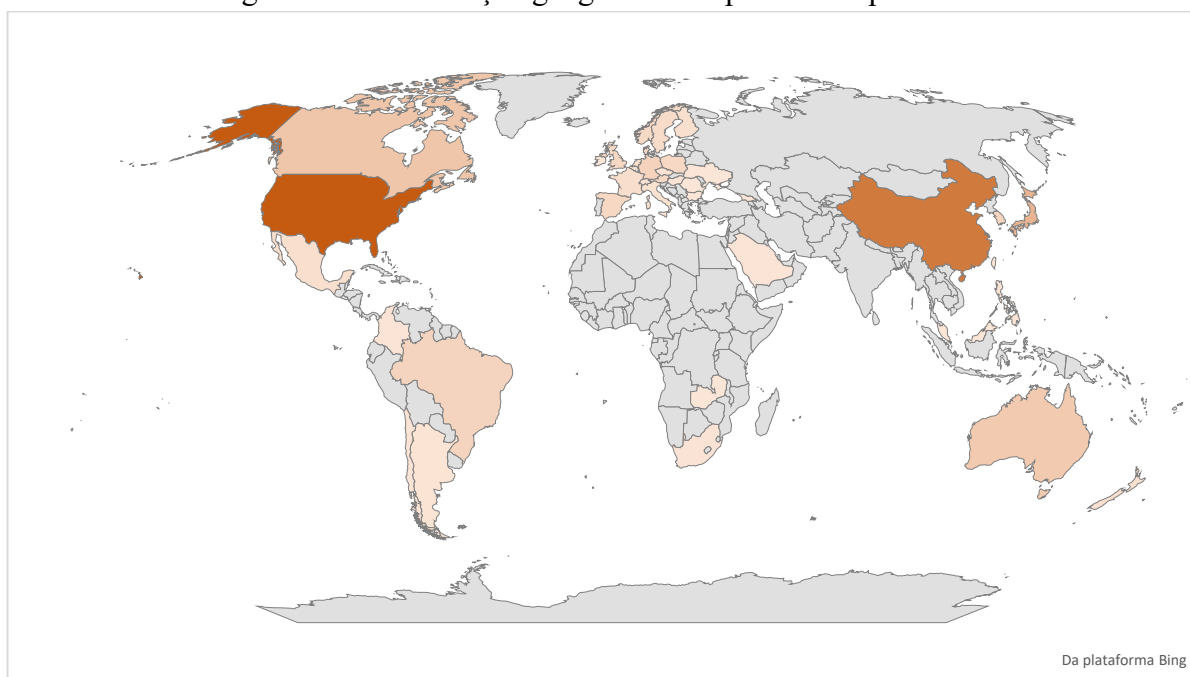
Da mesma forma, a [Figura 32](#) exhibe a distribuição global das patentes, demonstrando uma concentração significativa nos países mais desenvolvidos, como Estados Unidos (254 patentes) e na China (196 patentes). Esses dois países lideram o número de solicitações de patentes, reflexo direto de seus elevados investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica. Esse domínio também pode ser associado à presença de grandes empresas multinacionais, centros de pesquisa de ponta e políticas públicas de incentivo à proteção da propriedade intelectual.

Figura 31 - Distribuição geográfica dos artigos indexados.



Fonte: Adaptado das plataformas: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*.

Figura 32 - Distribuição geográfica das patentes depositadas.



Fonte: Adaptado das plataformas: *USPTO*, *Patentscope*, *Wordwide* e *Spacenet*.

Países como Canadá (58), Austrália (50), Alemanha (35) e Japão (24) também apresentam números expressivos, reforçando o papel das nações industrializadas na geração de conhecimento tecnológico protegido. A presença europeia tem destaque com países como França, Suécia, Suíça e Reino Unido, todos com contribuições. Esses números refletem o

comprometimento de nações da União Europeia com a inovação e eficácia dos sistemas de patentes locais e regionais, como o Escritório Europeu de Patentes (EPO).

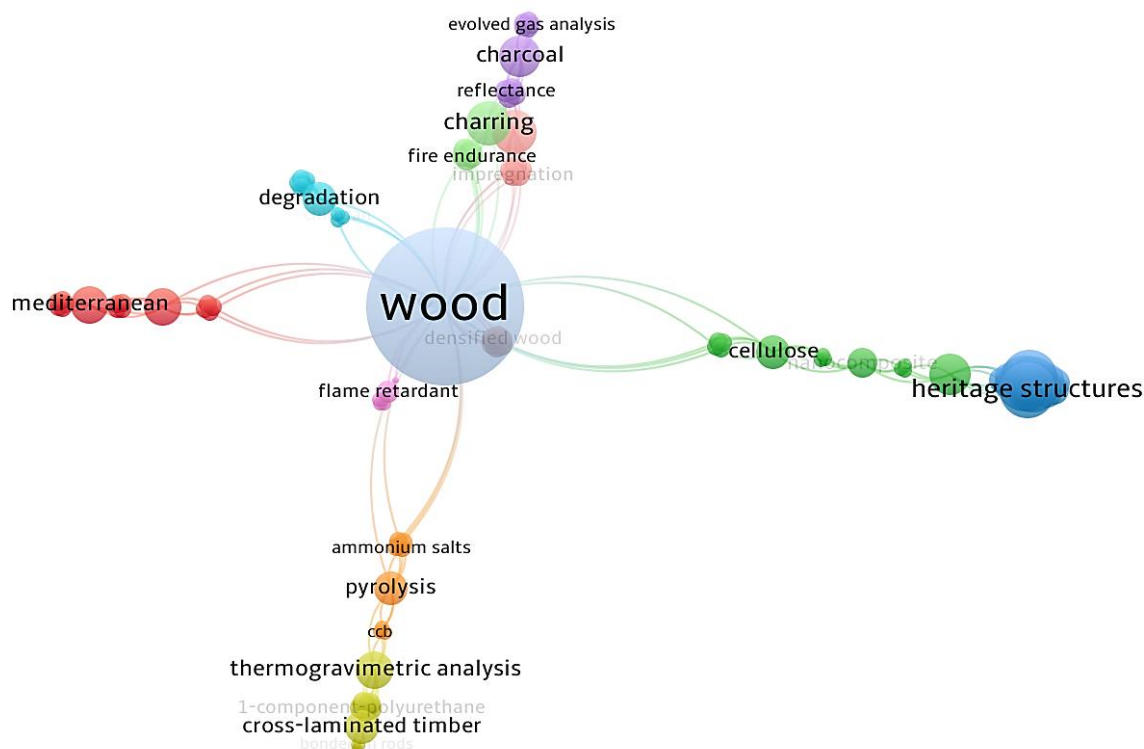
No contexto da América Latina, o Brasil se destaca como o país com o maior número de patentes registradas, totalizando 32 depósitos. Esse número é significativamente superior em relação a países como México (12), Argentina (3), Chile (2) e Colômbia (2), colocando o Brasil como referência em termos de capacidade tecnológica e inovação na região latino-americana. Esse protagonismo pode ser atribuído à maior estrutura de pesquisa científica, universidades e centros tecnológicos. Entretanto, apesar de liderar frente a essa região, o Brasil ainda apresenta um desempenho modesto quando comparado às potências globais, o que remete a necessidade de avanços em investimentos e maiores estímulos à inovação para alcançar competitividade internacional.

Ainda no âmbito dos resultados bibliométricos, um mapa de coocorrência de palavras-chave (Figura 33) extraídas dos artigos científicos encontrados é apresentado. Nesse tipo de análise é possível identificar os termos que aparecem com maior frequência nos documentos, revelando as principais áreas de pesquisa e suas inter-relações. O termo de maior ocorrência nos artigos pesquisados foi “*wood*”, indicando que todos os demais termos orbitam em torno dessa temática, formando clusters distintos que representam subtemas ou linhas de investigação específicas.

Observa-se a formação de um cluster em torno da palavra “*combustion*” (combustão), conectado a termos como “*pyrolysis*” (pirólise), “*biomass*” (biomassa) e “*fluidized bed*” (leito fluidizado), o que indica a forte associação entre a madeira como fonte de biomassa e estudos de entendimento quanto a sua queima controlada e/ou aproveitamento energético. Este agrupamento também está ligado a tópicos de análise térmica, como “*thermogravimetric analysis*” (análise termogravimétrica), evidenciando o interesse na caracterização térmica da madeira e seus produtos derivados durante os processos de conversão energética.

Outro cluster interessante está destacado com as palavras “*cellulose*”, “*nanocomposite*” e “*finite element analysis*”, que mostra um enfoque em aplicações avançadas de materiais à base de madeira, em especial no desenvolvimento de nanocompósitos e na modelagem computacional por meio do método dos elementos finitos. Este ramo do gráfico aponta para pesquisas mais tecnológicas e estruturais, onde a madeira e seus constituintes são explorados como materiais funcionais em engenharia. Além disso, a presença de termos ligados à proteção e desempenho ao fogo, como “*degradation*”, “*char*”, “*flame retardant*” e “*fire retardance*”, formam um conjunto de palavras que reforça a relevância do estudo do comportamento térmico da madeira em situações de incêndio.

Figura 33 - Coocorrência de palavras-chave dos artigos eu compõe o corpo basilar.



Fonte: Adaptado das plataformas: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*.

3.2.2 Análise dos dados bibliográficos

Esta seção trata de uma revisão do estado da arte, incluindo os artigos publicados em periódicos internacionais e trabalhos acadêmicos que abordam temáticas correlacionadas. O levantamento bibliográfico focou em estudos sobre o reforço de vigas de madeira com barras metálicas, especialmente em situações de exposição ao fogo, contemplando análises experimentais, numéricas e teóricas. Entretanto, a escassez de trabalhos com esse foco, elevou a revisão para uma análise mais ampla, abordando também reforços de materiais compósitos e análises em temperatura ambiente. Assuntos contíguos como a carbonização da madeira quando da ignição do incêndio e as propriedades mecânicas necessárias ao processamento das simulações numéricas, também foram abordadas por serem importantes ao tema. Os artigos selecionados forneceram subsídios importantes tanto para compor o lastro basilar metodológico, quanto para a interpretação dos resultados obtidos durante a investigação.

Além das publicações em periódicos indexados, foram consideradas dissertações, teses e trabalhos acadêmicos disponíveis. Essa ampliação da busca bibliográfica garantiu uma

abordagem completa do estado da arte, identificando zonas de incerteza científica e estabelecendo relações com estudos anteriores.

Os trabalhos revisados abordam diferentes aspectos do comportamento estrutural da madeira, incluindo sua resposta mecânica, os mecanismos de carbonização, a interação com reforços e a aplicação de métodos computacionais na previsão do desempenho estrutural. A diversidade de abordagens encontradas permitiu uma compreensão dos parâmetros que influenciam a segurança e a durabilidade de elementos estruturais híbridos (madeira + reforço).

Além disso, a revisão também é uma oportunidade para identificar a inóvia de pesquisas que integrem de forma sistemática os efeitos térmicos e estruturais em vigas de madeira com reforços passivos de barras metálicas, considerando diferentes normatizações, justificando a relevância e ineditismo desse trabalho. O conjunto de trabalhos e referências utilizadas estão elencados nas [Tabelas 14, 15 e 16](#).

A análise das metodologias empregadas nos estudos revisados mostrou a predominância de modelos numéricos via elementos finitos, geralmente validados por ensaios laboratoriais de pequena ou média escala. Embora essas abordagens forneçam resultados consistentes, observou-se grande variação nos parâmetros de entrada e nas condições de contorno, dificultando comparações diretas entre estudos e reforçando a necessidade de discuti-los individualmente. Essa heterogeneidade evidencia a importância de aprofundar investigações sobre configurações específicas de reforço, como barras metálicas embutidas, cuja resposta termomecânica acoplada ainda é pouco sistematizada.

Também foram identificadas diferenças relevantes nos critérios de carbonização adotados. Enquanto alguns autores utilizam taxas constantes, outros recorrem a modelos dependentes da temperatura, densidade e propriedades térmicas da madeira. Essas escolhas influenciam diretamente a previsão do tempo de resistência ao fogo e a evolução das tensões internas durante o aquecimento.

Por fim, verificou-se que muitos estudos investigam fenômenos de forma isolada, reforço, carbonização ou comportamento térmico, sem integrá-los em um modelo termoestrutural unificado. Essa fragmentação limita a compreensão abrangente do desempenho de vigas reforçadas sob incêndio e evidencia a necessidade de abordagens acopladas, capazes de representar simultaneamente transferência de calor, degradação mecânica e interação madeira-aço.

Tabela 14 - Relação de trabalhos provenientes de periódicos para composição basilar do estudo proposto.

(continua)

Artigos científicos de periódicos					
	Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
1	Schaffer	1967	Charring rate of selected woods - transverse to grain	USDA Forest Service (FPL RP-69)	Medir a taxa de carbonização de madeiras sob fogo perpendicular às fibras.
2	Babrauskas	2005	Charring rate of wood as a tool for fire investigations	Fire Science and Technology	Avaliar a confiabilidade da taxa de carbonização como ferramenta em perícias de incêndio.
3	Yang et al.	2009	Charring depth and rate of glulam after standard fire test	Building and Environment	Avaliar a profundidade de carbonização de diferentes espécies em madeira lamelada colada (MLC/GLT) expostas a fogo padrão.
4	Nubissie; Ngamie; Wofo	2011	Dynamical behavior of a wooden beam under mechanical loading and fire	Materials and Design	Desenvolver um modelo numérico para prever tempo de falha e comportamento dinâmico de vigas sob fogo.
5	Fiorelli, J.; Dias, A.A.	2011	Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation	Materials and Structures	Avaliar experimental e teoricamente o reforço de vigas de madeira lamelada com polímeros reforçados com fibras (FRP) externos.
6	Luca; Marano	2012	Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars	Construction and Building Materials	Avaliar o comportamento à flexão de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas e pré-tensionadas com barras de aço.
7	García et al.	2013	Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials	Composites: Part B	Investigar de forma experimental o reforço à flexão de vigas de madeira com compósitos de fibras de carbono e basalto, analisando diferentes configurações.
8	Mascia; Simoni	2013	Analysis of failure criteria applied to wood	Engineering Failure Analysis	Comparar critérios de ruptura aplicáveis à madeira (Hill, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Norris) usando testes biaxiais e modelos teóricos com madeiras brasileiras.
9	Raftery; Harte	2013	Nonlinear numerical modelling of FRP reinforced glued laminated timber	Composites	Desenvolver por meio de elementos finitos um modelo numérico não linear para simular o comportamento de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com placas de FRP.

Tabela 15 - Relação de trabalhos provenientes de periódicos para composição basilar do estudo proposto.

(continuação)

Artigos científicos de periódicos				
Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
10 Pečenko; Svensson; Hozjan	2015	Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire	International Journal of Heat and Mass Transfer	Desenvolver um modelo numérico de transferência de calor e umidade em madeira exposta ao fogo, considerando carbonização.
11 Fossetti et. al	2015	Flexural Behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords	Construction and Building Materials	Avaliar o comportamento à flexão de vigas de madeira glulam reforçadas com cordões de GFRP, CFRP e bastões de basalto, além de propor um modelo analítico para prever a rigidez.
12 Raftery; Kelly	2015	Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber	Composites: Part B	Avaliar o reforço e reparo de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) com bastões de FRP de basalto colados internamente, analisando desempenho mecânico e modos de falha.
13 Khelifa et al.	2015	Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with carbon fibre-reinforced polymers	Engineering Structures	Modelar numericamente o reforço de vigas de madeira com CFRP utilizando elementos finitos não-lineares, validando com resultados experimentais.
14 Raftery; Rodd	2015	FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive	Construction and Building Materials	Investigar o desempenho estrutural de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) de baixa qualidade reforçadas com placas de GFRP coladas com adesivo PRF, evitando o uso de epóxi.
15 Soriano; Pellis; Mascia	2016	Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars	Composite Structures	Avaliar o desempenho de vigas madeira lamelada colada (MLC/CLT) reforçadas com barras de aço, em especial a rigidez e capacidade de carga.
16 Nadir et al.	2016	Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets	Construction and Building Materials	Avaliar a eficácia do uso de chapas de GFRP e CFRP no aumento da rigidez e resistência de vigas glulam.
17 Yang et al.	2016a	Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars	Construction and Building Materials	Avaliar vigas madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com barras de CFRP pré-tensionadas experimental e teoricamente.

Tabela 16 - Relação de trabalhos provenientes de periódicos para composição basilar do estudo proposto.

(continuação)

Artigos científicos de periódicos				
Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
18 Yang et al.	2016b	Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation	Construction and Building Materials	Analisar experimental e teoricamente o comportamento à flexão de vigas madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com FRP e aço.
19 Rescalvo et al.	2018	Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects When reinforced with carbon fiber strips	Composite Structures	Avaliar reforços com CFRP em vigas antigas com defeitos, utilizando testes experimentais e análises analíticas.
20 Corradi et al.	2018	Flexural behaviour of hardwood and softwood beams with mechanically connected GFRP plates	Composite Structures	Estudar o reforço de vigas de madeira dura e macia com placas de GFRP conectadas mecanicamente, visando reversibilidade e comportamento em altas temperaturas.
21 Gómez et al.	2019	Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers	Composite Structures	Estudar experimentalmente o comportamento à flexão de vigas de madeira com diferentes tipos de fibras FRP e metálicas.
22 Vahedian et al.	2019	Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments	Composites: Part B	Investigar o reforço de vigas madeira lamelada colada (MLC/GLT) com CFRP por meio de testes em escala real e modelos teóricos.
23 Donadon et al.	2020	Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran - FRP reinforcement	Engineering Structures	Avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de vigas de madeira lamelada colada reforçadas com fibras de Vectran-FRP e desenvolver uma análise numérica comparativa.
24 Rescalvo et al.	2021	Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material	Construction and Building Materials	Investigar de forma experimental o uso de materiais de carbono embutidos para melhorar a ductilidade e resistência à flexão de vigas de madeira de álamo.
25 Christoforo et al.	2022	Reinforcement of timber beams with steel bars: parametric analysis using the finite element method	Buildings	Realizar análise paramétrica por MEF de vigas de madeira reforçadas com aço, avaliando forças e deslocamentos.
26 Špilák et al.	2022	Determining the charred layer with finite element analysis	Fire Safety Journal	Simular por MEF a espessura da camada carbonizada em vigas de abeto, com base no método da entalpia.

Tabela 17 - Relação de trabalhos provenientes de periódicos para composição basilar do estudo proposto.

(conclusão)

Artigos científicos de periódicos				
Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
27 He et al.	2022	An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams	Frontiers in Materials	Investigar experimentalmente e numericamente a influência de diferentes arranjos de CFRP embutido em vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) sob flexão.
28 Wdowiak-Postulak	2023	Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass pre-stressed bars	Composite Structures	Avaliar experimental e numericamente o desempenho de vigas reforçadas com barras de aço, basalto e vidro.
29 Kátai-Urbán; Cimer; Lublók	2023	Examination of the fire resistance of construction materials in chemical warehouses	Fire (MDPI)	Avaliar desempenho de vigas de diferentes materiais sob incêndio em armazéns químicos.
30 Nguyen et al.	2023	Method of measuring the temperature of wood exposed to fire with type k thermocouples	Fire Safety Journal	Comparar métodos de medição da temperatura e taxa de carbonização em madeira com termopares tipo K.
31 Wang et al.	2025	Deformation of heated and loaded wooden stick: towards fire safety design of timber structure	Case Studies in Construction Materials	Avaliar a deformação de madeira aquecida e carregada antes da ignição, com foco em segurança estrutural.
32 Wdowiak-Postulak; Kawecki	2025	Investigations on structural-sized glt beams reinforced with steel and frp composite bars: experimental tests and nonlinear numerical approach	Archives of Civil and Mechanical Engineering	Avaliar de forma experimental o reforço de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) com barras de aço, BFRP e GFRP e validar modelos numéricos não-lineares.

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 18 - Relação de trabalhos provenientes de conferências para composição basilar do estudo proposto.

Artigos de conferência				
Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
33 Matsuoka; Fukudome; Shioya	2021	Heat resistance of steel bar-timber composite beam	WCTE 2021 (World Conference on Timber Engineering)	Analisar a resistência térmica e o comportamento à fluência de vigas híbridas sob altas temperaturas.
34 Matsushita; Shioya	2023	A new method for modelling temperature within steel bar-timber composite beam using data by burning test	WCTE 2023 Conference Paper	Propor um novo método para modelar temperatura interna de vigas híbridas madeira-aço com base em testes de queima.
35 Matsushita; Shioya	2023	Burning test of steel bar timber composite beam	WCTE 2023 Conference Paper	Avaliar o desempenho ao fogo de uma viga híbrida em tamanho real após 60 minutos de queima.

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 19 - Relação de trabalhos provenientes de repositórios para composição basilar do estudo proposto.

Teses de doutorado e dissertações de mestrado				
Autor(es)	Ano	Título do trabalho	Revista/Instituição	Objetivo do trabalho
36 Silva	2022	Influência dos modelos de carbonização na análise não linear geométrica de treliças de madeira em situação de incêndio	UFSCar (Tese de Doutorado)	Avaliar a influência da carbonização na resistência de treliças de madeira com análise via MEF posicional.
37 Martins	2016	Análise numérica e experimental de vigas de madeira lamelada colada em situação de incêndio	EESC/USP (Tese de Doutorado)	Analisar o comportamento termoestructural de MLCs brasileiras e métodos normativos de dimensionamento.

Fonte: Próprio autor (2025).

3.2.2.1 Análise e discussão dos estudos experimentais selecionados

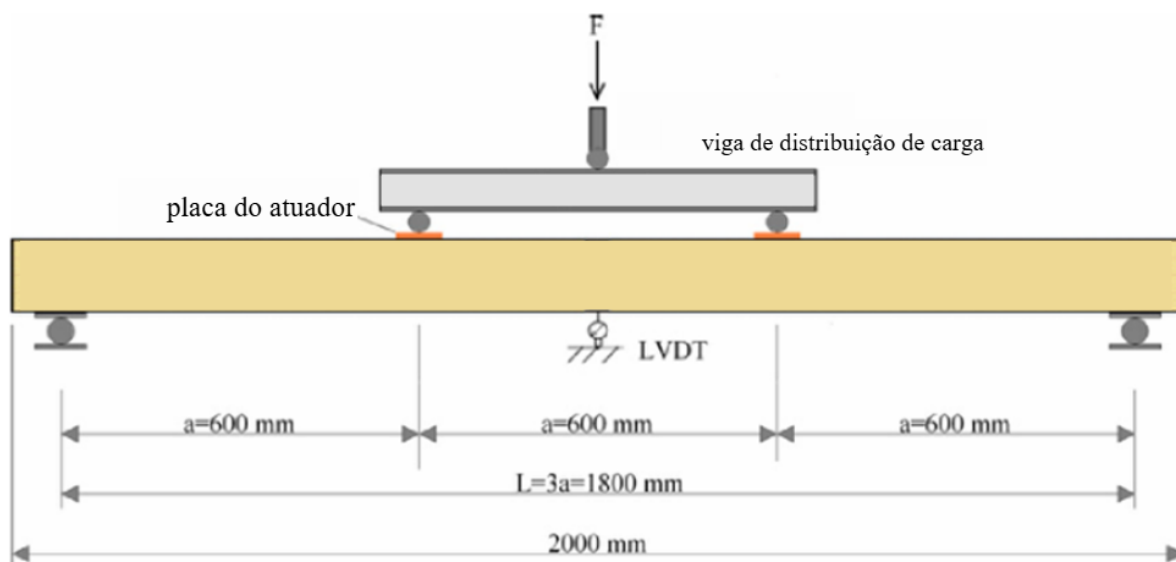
3.2.2.1.1 Avaliação do estudo de Luca e Marano (2012)

Luca e Marano (2012) objetivaram investigar o desempenho estrutural de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com barras de aço pré-tracionadas. O trabalho se concentrou na comparação entre vigas reforçadas e não reforçadas, por meio de ensaios de flexão a quatro pontos (Figura 34) em escala real, para avaliar as propriedades mecânicas resultantes da aplicação do reforço metálico.

Foram testadas vigas de madeira de *Quercus alba* (Carvalho branco) com diferentes arranjos de reforço em barras de aço, incluindo quantidades de vigas e posicionamentos variados. As vigas submetidas aos testes foram divididas em três categorias, denominadas série T, R e P, sendo sem reforço, simplesmente reforçadas e reforço de aço protendido respectivamente.

A madeira lamelada colada utilizada foi classificada e caracterizada pelo fabricante como grau GL28 em acordo com a norma prEN1194. Já as barras de aço utilizadas nos testes eram de grau C45 ($\varnothing 10\text{mm}$) em conformidade com a norma UNI EN10083/1998.

Figura 34 - Configuração de ensaio de flexão a quatro pontos.



Fonte: Adaptado de Luca e Marano (2012).

Após os testes experimentais, um modelo teórico para o compósito madeira-aço com trajetórias não lineares de tensão-deformação foi então aplicado para calcular o momento de ruptura, almejando comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas. Os dados

obtidos experimentalmente mostraram que os reforços com barras de aço proporcionaram aumento na capacidade de carga, rigidez e na ductilidade para vigas lameladas coladas, conforme os dados da [Tabela 17](#).

Tabela 20 - Comparativo de desempenho de propriedades mecânicas das vigas ensaiadas.

Série	Módulo elástico (E) (kN/mm ²)	Limite proporcional		Limite último		Pós- falha Deflexão no meio do vão (mm)	Ductilidade
		Deflexão no meio do vão (mm)	Carga (kN)	Deflexão no meio do vão (mm)	Carga (kN)		
T	7.635,00	8,80	4.300,00	6,80	2.609,00	12,40	1.104
R	9.612,00	23,20	22.148,00	49,50	37.886,00	78,30	1.587
P	10.528,00	27,10	28.516,00	40,90	35.859,00	75,20	1.977
Comparativo percentual de desempenho entre as séries							
RxT	25,90%	7,60%	18,50%	18,40%	48,10%	68,20%	43,80%
PxT	37,90%	7,80%	52,60%	2,30%	40,20%	61,60%	79,10%
PxR	9,50%	16,60%	28,70%	17,50%	5,40%	3,90%	24,50%

Fonte: Adaptado de Luca e Marano (2012).

Esse estudo evidenciou que o uso de barras de aço constitui uma estratégia eficaz para o reforço da capacidade de flexão de vigas de madeira. Os resultados obtidos, ainda que preliminares, corroboram achados experimentais de outros pesquisadores, os quais demonstraram que a resistência à flexão pode ser aprimorada por meio do reforço e da protensão de vigas de madeira lamelada colada com barras metálicas. Um dos aspectos mais relevantes observados na investigação foi a formação de uma zona dúctil bem definida em uma das vigas reforçadas, comportamento contrastante com o das vigas não reforçadas, que apresentaram ruptura de natureza frágil.

3.2.2.1.2 Avaliação do estudo de Matsushita e Shioya (2023a)

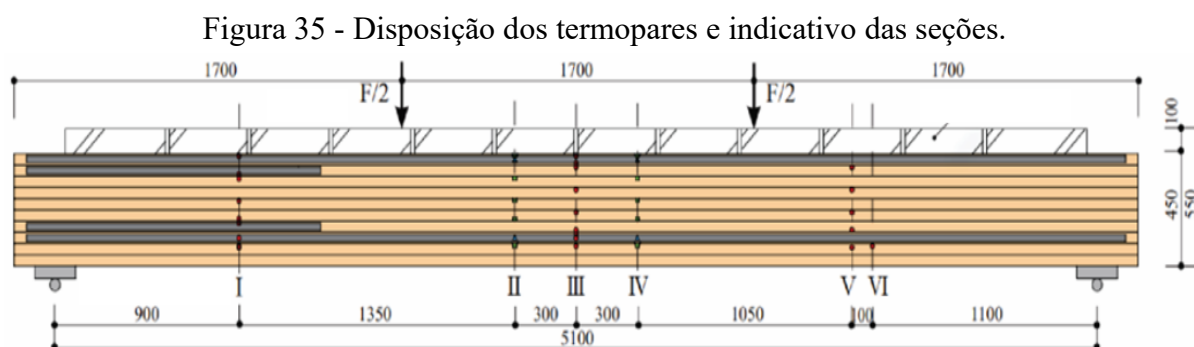
Matsushita e Shioya (2023a) desenvolveram sistema de pórticos de elementos híbridos de madeira reforçados com barras de aço nervuradas, comumente chamadas de vergalhões. Para tanto, houve a necessidade de investigar o desempenho a resistência ao fogo dos elementos estruturais. Os autores propuseram [Equações](#) analíticas 13 e 14 que estimassem a temperatura em função do tempo e da seção transversal, expressa pelas seguintes variáveis:

$$T = T_r + (T_c - T_r) \cdot \left(\frac{v_c \cdot t}{d_m} \right)^n \quad (13)$$

$$T = T_r + 2 \cdot (T_c - T_r) \cdot \left(\frac{v_c \cdot t}{d_m} \right)^n \quad (14)$$

Onde na [Equação 13](#), T é a temperatura da madeira no ponto de medição (°C), T_r representa a temperatura ambiente antes da queima (°C), T_c é temperatura de carbonização da madeira, v_c indica a taxa de carbonização da madeira (mm/min), t é o tempo de exposição da madeira ao fogo (minutos), d_m é a distância entre a superfície da viga e o ponto de medição (mm) e n é o expoente empírico ajustado experimentalmente (adimensional). Já a [Equação 14](#) sofre um ajuste com o acréscimo de uma constante (2), devido ao efeito de vapor d'água na parte superior da viga.

O modelo foi baseado na análise de dados coletados em um teste de queima com duração de 60 minutos, em que termopares foram estrategicamente posicionados ([Figura 35](#)) ao longo da seção transversal da viga para registrar a variação térmica. A metodologia considerou a distribuição não linear de temperatura e a presença de gradientes térmicos intensos entre as regiões carbonizadas e a madeira íntegra, além da inércia térmica da barra de aço embutida.



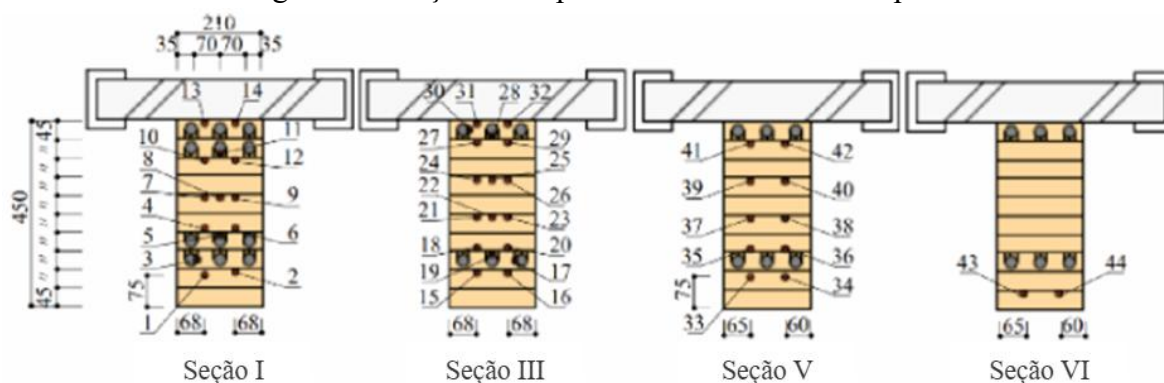
Fonte: Adaptado de Matsushita e Shioya (2023a).

A principal seção da viga (seção II-IV) submetida ao teste, apresentava um arranjo simétrico com três vergalhões embutidos tanto na parte superior quanto na inferior da seção transversal, caracterizando um reforço nas zonas de maior solicitação à tração e compressão durante a flexão ([Figura 36](#)). Esse tipo de configuração buscou aumentar a capacidade de carga e a ductilidade do elemento, especialmente sob condições térmicas extremas.

A inclusão da seção I no projeto experimental revelou uma preocupação em entender com mais profundidade o impacto do número e da quantidade de barras de reforço na elevação térmica interna da madeira durante a exposição ao fogo. A madeira *Cryptomeria japonica* (Cedro japonês), uma espécie tradicionalmente utilizada na construção japonesa foi utilizada para construção da viga. As barras de aço do tipo SD390, com diâmetro de 29 mm e alta

resistência ao escoamento, aliadas à aplicação de uma resina resorcinólica estrutural, garantiram a integridade da colagem entre as lamelas e o reforço.

Figura 36 - Seções com posicionamento dos termopares.



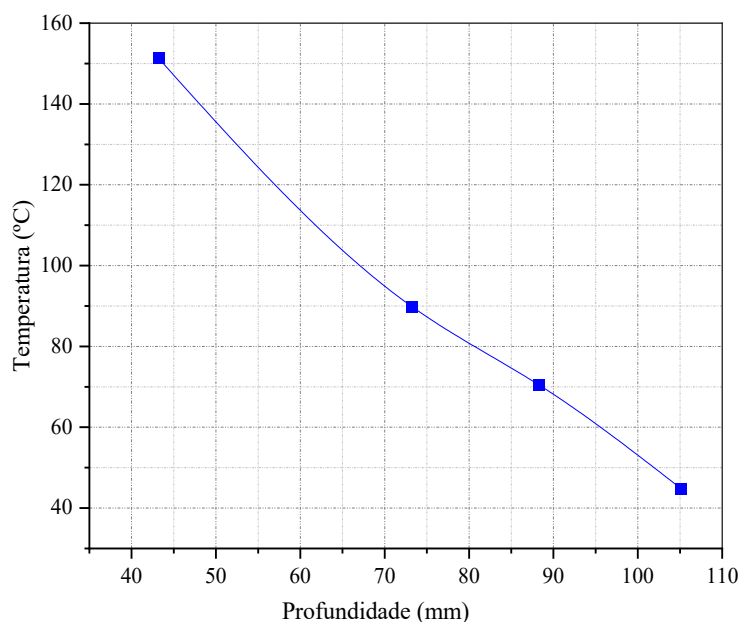
Fonte: Matsushita e Shioya (2023a).

Com os resultados obtidos do experimento, é possível traçar um gráfico (Figura 37) que mostra a variação da temperatura na madeira em função da profundidade, com base nos dados do ensaio de queima de 60 minutos. Os autores evidenciam que quanto maior a profundidade da barra em relação à superfície exposta, menor é a temperatura atingida, chegando a valores próximos da temperatura ambiente a 105 mm de profundidade, indicando excelente isolamento térmico nas regiões centrais da viga.

Outro diferencial do estudo foi a capacidade de modelar com precisão a temperatura nas regiões internas da viga, onde os sensores reais não alcançam com facilidade. Isso é especialmente relevante no caso de estruturas híbridas, nas quais o reforço metálico está totalmente envolto pela madeira, dificultando a verificação empírica contínua durante um incêndio. A modelagem, portanto, permitiu prever a integridade estrutural das barras de aço durante diferentes estágios da carbonização da madeira e forneceu subsídios importantes para cálculos estruturais baseados em temperatura.

Os resultados demonstraram que as equações propostas preveem com precisão a temperatura nas barras de aço internas, mesmo com a complexidade dos gradientes térmicos induzidos pela carbonização da madeira. O modelo foi validado com resultados experimentais e comparado com simulações de elementos finitos. Os autores concluíram que a nova formulação pode ser aplicada em cálculos de engenharia de segurança contra incêndios, especialmente para prever a resistência residual de vigas mistas sob altas temperaturas.

Figura 37 - Variação da temperatura na madeira em função da profundidade (ensaio de queima por 60 minutos).



Fonte: Adaptado de Matsushita e Shioya (2023a).

3.2.2.1.3 Avaliação do estudo de Matsushita e Shioya (2023b)

Em um estudo paralelo, Matsushita e Shioya (2023b) também avaliaram o desempenho ao fogo de vigas compostas de madeira e barras de aço, submetidas a testes reais de queima (Figura 38). O objetivo foi medir a integridade estrutural durante o incêndio e registrar a propagação da temperatura nos elementos.

Figura 38 - Corpo de prova antes do teste de carga



Fonte: Matsushita e Shioya (2023b).

Durante os testes, observou-se que as barras de aço retardaram o colapso das vigas ao redistribuir os esforços após a carbonização superficial da madeira. As temperaturas críticas nas barras foram atingidas apenas após 40 minutos de exposição a 800 °C, indicando boa proteção

térmica pela madeira. As vigas compostas possuem desempenho superior às vigas de madeira pura em situações de incêndio, demonstrando viabilidade para uso em estruturas com exigências de resistência ao fogo.

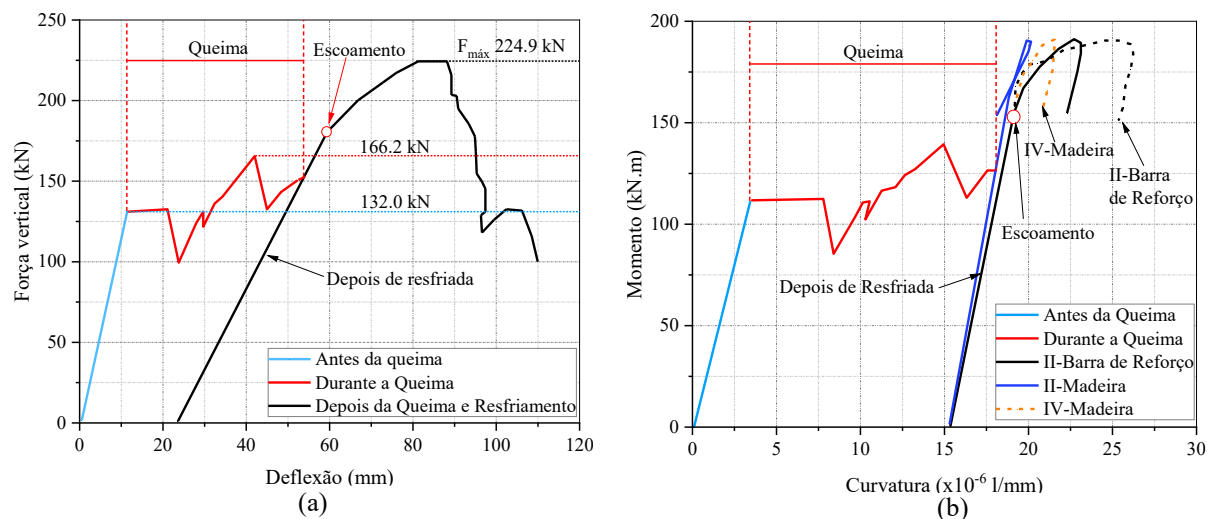
Os autores apresentaram os resultados experimentais por meio de gráficos que permitem uma visualização do comportamento do elemento durante o ensaio. Na [Figura 39b](#), observa-se uma diminuição na rigidez associada à curvatura da armadura, destacada por um círculo de contorno vermelho. Esse mesmo ponto é identificado na [Figura 39a](#), onde se verifica uma redução correspondente na rigidez da deflexão da viga.

A [Figura 39a](#) indica, por meio de uma linha tracejada em vermelho, a força máxima alcançada durante o ensaio de queima, de 166,2 kN. Esse valor representa 73,9% da carga máxima observada no ensaio realizado após o resfriamento do corpo de prova ($F = 224,9$ kN), sugerindo que o carregamento adicional imediatamente após a queima de 60 minutos não foi suficiente para revelar toda a capacidade resistente da viga. Em contrapartida, a carga máxima registrada após o resfriamento corresponde a 170,4% da carga admissível de longa duração (132 kN), indicando que o componente estruturado foi capaz de suportar esforços significativos sem entrar em colapso durante o período de exposição ao fogo.

As conclusões obtidas a partir do estudo experimental indicam que a viga composta por madeira e armaduras de aço apresentou comportamento compatível com os pressupostos teóricos adotados. Verificou-se que madeira e armadura localizadas na mesma seção transversal da viga deformaram de forma equivalente, confirmando a validade da hipótese da seção plana.

A rigidez à flexão e à deflexão pôde ser estimada com precisão por meio do módulo de elasticidade das lamelas, considerando também os efeitos da deformação por cisalhamento. Mesmo após 60 minutos de exposição ao fogo, a viga manteve sua capacidade resistente à flexão e ao cisalhamento, em conformidade com o modelo teórico proposto. Durante o incêndio, a estrutura suportou até 126% da carga admissível de longa duração, e após o resfriamento, atingiu 170,4% dessa carga antes de colapsar, evidenciando a segurança do método de cálculo utilizado. Entretanto, as tensões térmicas causadas pelo gradiente de temperatura entre a superfície e o interior da viga geraram deformações adicionais nas armaduras centrais, provocando flambagem e escoamento precoce. A profundidade de carbonização observada após 60 minutos foi compatível com os parâmetros estabelecidos pelo Eurocode 5, sendo mais acentuada nas regiões próximas às armaduras laterais.

Figura 39 - Resultados do teste de carga em queima: (a) força x deformação; (b) momento x curvatura.



Fonte: Matsushita e Shioya (2023b).

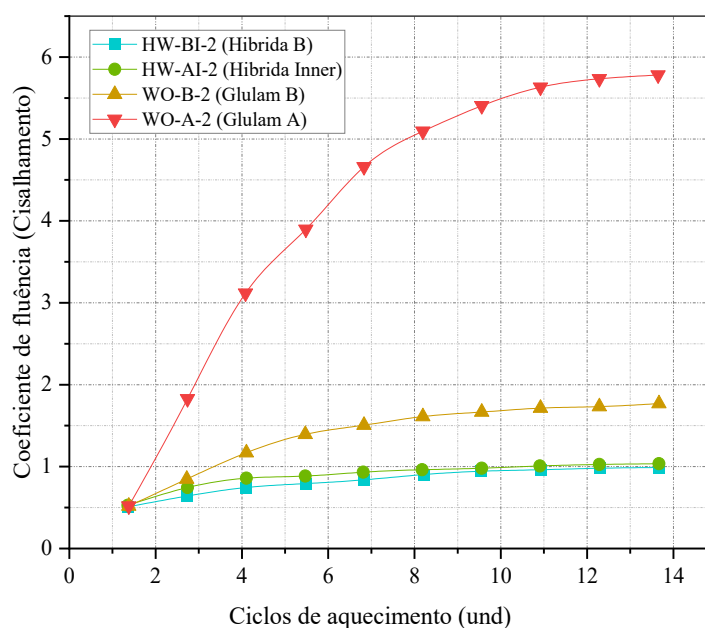
3.2.2.1.4 Avaliação do estudo de Matsuoka, Fukudome e Shioya (2021)

Matsuoka, Fukudome e Shioya (2021) investigaram a resistência térmica de vigas compostas madeira-aço sob condições de incêndio padrão. O objetivo foi comparar diferentes arranjos de reforço e verificar a contribuição das barras de aço para o desempenho térmico global.

O experimento conduzido foi cuidadosamente desenhado para avaliar a resistência ao calor de vigas híbridas compostas por lamelas de madeira colada (MLC/GLT) reforçadas com vergalhões de aço colados com adesivo epóxi. A ênfase do estudo esteve na observação do comportamento mecânico das vigas sob condições de alta temperatura, considerando o desempenho do adesivo utilizado na ligação entre madeira e aço. A análise mostrou que o epóxi apresenta perda acentuada de resistência acima de 110 °C, servindo esse valor como limite superior provisório de temperatura admissível para segurança estrutural durante incêndios.

O estudo também observou a influência da temperatura elevada sobre a fluência da madeira e da ligação adesiva (Figura 40). Foi constatado que, embora a madeira sofra deformações por fluência térmica, a presença das barras de aço embutidas atua como um mecanismo de contenção, reduzindo a deformabilidade excessiva e mantendo parte da integridade estrutural. Entretanto, com a degradação do adesivo a altas temperaturas, a eficácia do aço em conter essas deformações tende a diminuir, exigindo atenção especial para o projeto de ligações resistentes ao calor em sistemas híbridos.

Figura 40 - Evolução do coeficiente de fluência por cisalhamento



Fonte: Adaptado de Matsuoka, Fukudome e Shioya (2021).

Os autores recomendaram que, em projetos estruturais sujeitos à ação do fogo, o dimensionamento de vigas compostas madeira-aço deve considerar não apenas a temperatura crítica da madeira, mas também a estabilidade da interface adesiva. O estudo também destaca a necessidade de avanços em formulações de adesivos resistentes ao calor para ampliar o uso seguro de componentes híbridos em edifícios altos ou com maiores exigências de proteção passiva contra incêndios.

Os resultados experimentais revelaram que as barras de aço mantêm a integridade estrutural das vigas mesmo após a carbonização da madeira ao redor. A resistência residual foi considerável mesmo após 60 minutos de exposição, com o aço atuando como elemento portante após a perda da madeira. Concluiu que o uso de reforço metálico pode melhorar a segurança estrutural contra incêndios e recomenda o uso combinado de análises térmicas e mecânicas para projetos mais seguros.

3.2.2.1.5 Avaliação do estudo de Wang *et al.* (2025)

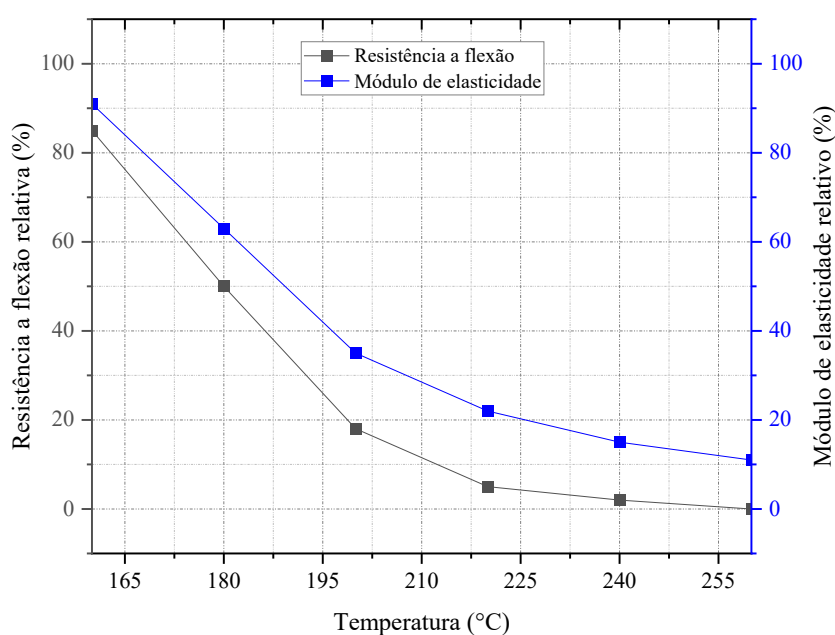
Wang *et al.* (2025) investigaram o comportamento termomecânico de pequenos bastões de madeira sob carga e aquecimento progressivo, como parte da segurança estrutural em incêndios. O objetivo foi entender a deformação antes da ignição e o colapso por falha térmica. Os experimentos envolveram ensaios de flexão em três pontos com temperaturas de até 300 °C,

onde foram medidas a deformação, perda de massa e tensão de cisalhamento crítica. O objetivo era identificar os estágios de degradação térmica da madeira antes da combustão.

Os dados obtidos demonstraram que o aumento da temperatura acarreta maior deformação nas peças de madeira, atribuída a processos como secagem, fluência térmica e degradação estrutural. Verificou-se ainda que a resistência da madeira à ruptura diminui progressivamente com o aquecimento, evidenciando sua fragilidade sob condições térmicas elevadas (Figura 41). Observou-se que a deformação de elementos de madeira submetidos a carga pode se iniciar antes mesmo da ocorrência da combustão, sendo acentuada conforme a temperatura ambiente se eleva. A tensão crítica de cisalhamento para ruptura apresentou uma redução significativa, passando de 662 kPa a 150 °C para 74 kPa a 250 °C.

Esses resultados revelam um comportamento não linear e dependente do tempo, indicando que a madeira sob carga e calor não responde de maneira puramente elástica nem exclusivamente plástica, mas sim viscoelástica e dependente da taxa de aquecimento. Além disso, foi identificada uma zona de transição térmica entre 100 °C e 200 °C, onde ocorrem simultaneamente perda de água livre, início de decomposição da hemicelulose e relaxamento estrutural das microfibrilas de celulose. Essa faixa é crítica porque marca o início da perda acelerada de integridade mecânica, mesmo na ausência de chamas. A pesquisa também mostrou que a falha mecânica pode ocorrer por flexão ou cisalhamento, dependendo da taxa de carregamento e do gradiente térmico imposto.

Figura 41 - Resistência a flexão e módulo de elasticidade com a evolução da temperatura.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2025).

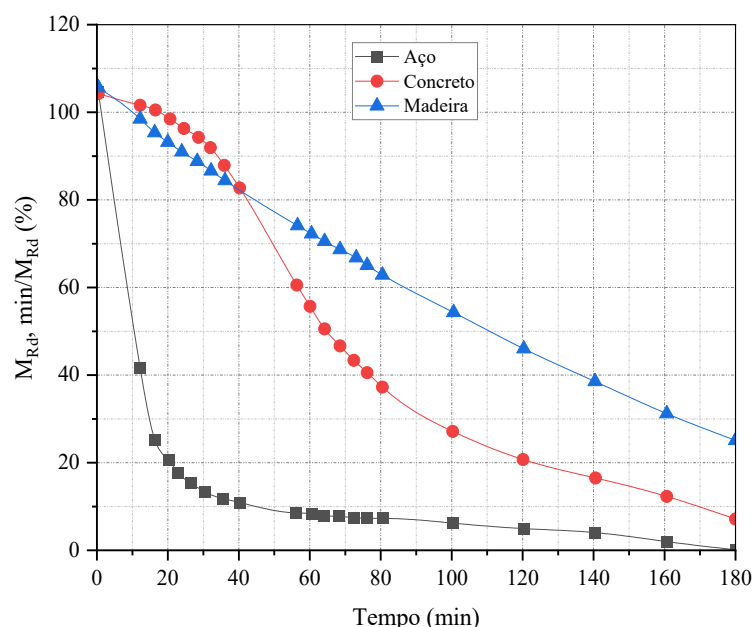
3.2.2.1.6 Avaliação do estudo de Kátaí-Urbán, Cimer e Lublók (2023)

Kátaí-Urbán, Cimer e Lublók (2023) focaram em avaliar a resistência ao fogo de vigas feitas de diferentes materiais, como madeira, aço e concreto armado, utilizados em galpões químicos com substâncias inflamáveis. O objetivo foi comparar seu desempenho estrutural sob calor extremo.

Utilizando métodos normativos da UE, os autores calcularam a capacidade de carga das vigas em diferentes temperaturas e avaliaram alterações nas propriedades dos materiais. Os resultados demonstraram que, mesmo menos utilizadas em galpões industriais, vigas de madeira podem ter desempenho superior ao do aço, principalmente após reforço com compósitos (Figura 42).

Foi possível observar diferenças significativas no desempenho dos três materiais analisados. A madeira apresentou o melhor desempenho, evidenciado pela sua redução gradual na capacidade de carga ao longo do tempo, em decorrência da diminuição progressiva de sua seção transversal, o que indica um comportamento mais previsível e resistente diante do fogo.

Figura 42 - Capacidades de carga de vigas de madeira, aço e concreto.



Fonte: Adaptado de Kátaí-Urbán, Cimer e Lublók (2023).

O aço, por outro lado, demonstrou alta sensibilidade térmica, perdendo rapidamente sua resistência estrutural, com queda significativa observada por volta dos 15 minutos de exposição, configurando o pior desempenho entre os materiais avaliados. Já o concreto armado mostrou

inicialmente um bom comportamento frente ao incêndio, porém entre 30 e 60 minutos houve uma redução acentuada em sua capacidade resistente, posicionando-se com um desempenho intermediário. Essas conclusões evidenciam a importância da escolha adequada de materiais em função da segurança contra incêndios em estruturas.

Além disso, o estudo destacou a importância de sistemas de proteção passiva e ativa, como revestimentos intumescentes e *sprinklers*, especialmente em galpões com produtos perigosos. No final os autores propõem diretrizes de segurança e reforço estrutural para galpões químicos, sugerindo que o uso estratégico da madeira, quando bem projetado e protegido, é viável e seguro em contextos industriais.

3.2.2.1.7 Avaliação do estudo de Fiorelli e Dias (2011)

Fiorelli e Dias (2011) avaliaram teoricamente e experimentalmente o comportamento de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com polímeros reforçados com fibra (FRP) colados externamente. A pesquisa teve como foco a análise da resistência última à flexão e da rigidez dessas vigas, considerando o efeito do reforço aplicado na face tracionada. Além disso, os autores propuseram modelos teóricos baseados na hipótese de Navier-Bernoulli para estimar o momento fletor último e a rigidez das vigas, validando-os com os dados obtidos em ensaios experimentais (Figura 43).

Figura 43 - Teste experimental a 4 pontos.



Fonte: Fiorelli e Dias (2011).

O trabalho utilizou madeira da espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com densidade média de 0,54 g/cm³ e teor de umidade de cerca de 12%. As tábuas foram classificadas visual e mecanicamente, sendo as de melhor qualidade colocadas nas regiões mais solicitadas à tração e compressão. Seis vigas de seção nominal 7 × 30 × 400 cm foram confeccionadas com nove

lâminas cada. Dessas, duas não possuíam reforço, enquanto as outras quatro receberam reforço com tecido de fibra de vidro unidirecional (UF 0900) aplicado na última linha de cola do lado tracionado, com percentuais de reforço de 1,2% e 3,3% da altura da viga. Um sistema de colagem com adesivo epóxi AR-300 foi empregado, e ensaios de flexão foram realizados segundo a norma ASTM D198-97.

Durante os ensaios, foram observados dois modos distintos de falha nas vigas reforçadas. O primeiro ocorreu por ruptura à tração na lâmina inferior sob a camada de FRP (momento M_1), e o segundo incluiu escoamento por compressão no topo da viga, seguido de falha por cisalhamento na interface fibra-madeira e ruptura por tração na madeira (momento M_2). A instrumentação incluiu extensômetros posicionados no centro do vão para medir as deformações em diferentes alturas da seção transversal.

Os resultados mostraram que as vigas reforçadas apresentaram aumentos significativos tanto na rigidez quanto na resistência à flexão, proporcionalmente ao percentual de reforço aplicado. A correlação entre os modelos teóricos e os dados experimentais foi considerada satisfatória, com diferenças inferiores a 5% para a rigidez e variações de até 29% para o momento fletor último na primeira fase de falha. Além disso, a presença de uma lâmina de madeira sob o reforço contribuiu para uma segurança adicional após a primeira falha (Tabela 18), destacando-se como uma solução eficaz para aumento da capacidade estrutural de vigas de madeira.

Tabela 21 - Valores experimentais para rigidez a flexão e momento de falha.

Viga	Rigidez a flexão (kN.cm ²)		$\frac{EI_{exp}^1}{EI_{est}^2}$	Momento de falha a flexão (kN.cm ²)			$\frac{M_2}{M_1}$	$\frac{M_1}{M_{est}^4}$
	Experimental	Estimado		M_1^3	M_2^3	Estimado		
01	16826,463	18179,793	0,92	3,824	-	3,888	-	0,98
02	17179,260	17458,861	0,98	4,220	-	3,655	-	1,15
03	22050,998	20186,708	1,09	6,200	7,835	5,249	1,26	1,18
04	19278,948	20080,207	0,96	6,143	6,875	6,161	1,12	0,99
05	24255,268	23300,058	1,04	8,173	8,906	6,291	1,09	1,29
06	21978,306	22844,327	0,96	7,948	8,568	7,280	1,08	1,09

Fonte: Adaptado de Fiorelli e Dias (2011).

Nota: ¹ Rigidez a flexão experimental; ² Rigidez a flexão estimado; ³ Momento; ⁴ Momento estimado.

3.2.2.1.8 Avaliação do estudo de Soriano, Pellis e Mascia (2016)

Soriano, Pellis e Mascia (2016) avaliaram o desempenho mecânico de vigas de madeira lamelada colada (glulam) reforçadas simetricamente com barras de aço, buscando aumentar a rigidez e a capacidade de carga dessas estruturas, especialmente para atender aos estados limites

de serviço. A pesquisa também investigou a aplicação do método da seção transformada para estimar o ganho de rigidez teórica das vigas reforçadas, comparando-o com os resultados obtidos em ensaios experimentais.

As vigas foram confeccionadas com madeira da espécie *Pinus elliottii*, utilizando sete lamelas por viga com espessura de 22 mm e umidade média de 10,5%. As lamelas foram classificadas em dois grupos (alta e baixa rigidez) por meio de ensaio ultrassônico, e a montagem das seções seguiu uma distribuição simétrica com as lamelas de melhor desempenho nas bordas. Ao todo, nove vigas com seção transversal de 52×154 mm e comprimento de 3000 mm foram fabricados. Três vigas compuseram o grupo de controle (MLC/GLT, sem reforço), enquanto os demais grupos foram reforçados internamente com barras de aço CA-50 de 10 mm de diâmetro, posicionadas na segunda lamela de cada face tracionada e comprimida. O grupo RGlulam2 contou com três vigas com taxa de armadura de 2%, e o grupo RGlulam4, com três vigas reforçadas com 4%. O adesivo utilizado foi um poliuretano monocomponente, apropriado para aplicações estruturais externas.

Os ensaios de flexão (Figura 44) em quatro pontos seguiram a norma ASTM D198, com vão de 2820 mm, e permitiram avaliar a rigidez e a carga última das vigas. Os dados de carga e deslocamento foram coletados com sistema de aquisição automatizado, e os valores de rigidez foram calculados no intervalo linear de 10% a 50% da carga máxima. O comportamento mecânico foi monitorado até a ruptura, registrando os modos de falha típicos de cada grupo: ruptura frágil nas lamelas tracionadas para o grupo das MLC/GLT, e falhas combinadas (trincas em tração, esmagamento em compressão e cisalhamento longitudinal) para os grupos reforçados.

Figura 44 - Teste de flexão.



Fonte: Soriano, Pellis e Mascia (2016).

Os resultados indicaram que as vigas reforçadas apresentaram ganhos significativos tanto na rigidez quanto na capacidade de carga. A rigidez aumentou em 52% para o grupo com 2% de armadura e em 73% para o grupo com 4%, em comparação às vigas sem reforço. Já a carga última cresceu 50% e 57% para os grupos RGlulam2 e RGlulam4, respectivamente. Além disso, os reforços contribuíram para reduzir a variabilidade nos resultados experimentais e modificar os modos de falha para comportamentos mais dúcteis. A comparação com o modelo teórico da seção transformada mostrou boa aproximação para o grupo RGlulam2, mas subestimou os resultados para RGlulam4, sugerindo limitações do modelo em altas taxas de armadura.

3.2.2.1.9 Avaliação do estudo Gómez et al. (2019)

Gómez et al. (2019) realizaram um estudo experimental comparativo sobre o comportamento à flexão de vigas de madeira reforçadas com diferentes tipos de fibras, incluindo fibras de carbono (CFRP), carbono de alto módulo elástico (CHM-CFRP), vidro (GFRP), basalto (BFRP) e fibras metálicas, todas aplicadas externamente com resina epóxi. A proposta central foi avaliar o desempenho mecânico das vigas com diferentes configurações de reforço – número de camadas e posição dos reforços – a fim de compreender os efeitos de cada material sobre a resistência, rigidez e ductilidade das vigas de madeira.

Foram utilizadas 33 vigas de madeira de alta qualidade da espécie *Pinus sylvestris*, com dimensões de 1100 mm × 100 mm × 46 mm. Cinco dessas vigas foram reservadas para a caracterização mecânica da madeira, enquanto as demais foram destinadas aos ensaios de flexão. A umidade média da madeira era de 8,4%, e a densidade média, de 509,2 kg/m³. O programa experimental compreendeu testes de flexão a quatro pontos, com reforços aplicados em três configurações principais: uma camada na face inferior, duas camadas na face inferior, e duas camadas nas laterais. Para cada tipo de fibra e configuração foram realizados dois ensaios, totalizando 28 vigas reforçadas. A identificação das vigas seguiu um código que indicava o número da viga, o número de camadas, a posição do reforço e o tipo de fibra.

Durante os testes, as vigas reforçadas com fibras de menor módulo elástico (vidro e basalto) apresentaram os melhores desempenhos tanto em termos de resistência quanto de deformação, enquanto as fibras mais rígidas (como o carbono de alto módulo e metálicas) mostraram desempenho inferior ou semelhante ao das vigas não reforçadas. Observou-se que a posição do reforço tem grande influência: reforços aplicados na face inferior se mostraram mais

eficazes e com comportamento mais previsível do que os posicionados nas laterais. Além disso, o uso de duas camadas não gerou um ganho proporcional em relação a uma única camada, indicando que o aumento da quantidade de material nem sempre resulta em melhorias significativas.

Os resultados mostraram que o uso de fibras de vidro e basalto aumentou a resistência à flexão das vigas em até 31,3%, e a capacidade de deformação em até 61,5%. As fibras metálicas apresentaram desempenho mais irregular, com destaque para um caso em que atingiram 91,2 MPa de resistência, embora com maior variabilidade. A fibra de basalto destacou-se por apresentar a melhor relação entre peso e desempenho, obtendo os maiores incrementos com menor densidade superficial. Por outro lado, as fibras de alto módulo elástico reduziram a ductilidade das vigas, o que pode comprometer a segurança estrutural em determinadas aplicações. Assim, o estudo concluiu que o tipo de fibra e sua rigidez são fatores determinantes para a eficácia do reforço, sendo preferíveis aquelas com menor módulo elástico quando se busca melhorar tanto a resistência quanto a deformabilidade das vigas de madeira.

3.2.2.1.10 Avaliação do estudo Vahedian, Shrestha e Crews (2019)

Vahedian, Shrestha e Crews (2019) objetivaram investigar por meio de ensaios experimentais em escala real e modelagem analítica, o comportamento de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas externamente com folhas de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP). A pesquisa teve como foco avaliar a influência de variáveis geométricas da ligação - comprimento, largura e espessura da interface de colagem - sobre a capacidade resistente, rigidez, ductilidade e modo de ruptura das vigas reforçadas. Além disso, foi desenvolvido um modelo analítico para prever a capacidade última à flexão das vigas, permitindo comparar os resultados experimentais e teóricos.

Foram ensaiadas oito vigas de *Pinus* laminado GL10, sendo duas sem reforço (grupos de controle) e seis reforçadas com diferentes configurações de CFRP. Todas as vigas apresentaram 1800 mm de comprimento total, 45 mm de largura e 90 mm de altura. As folhas de CFRP, com espessura nominal de 0,167 mm, foram coladas na face tracionada das vigas usando adesivo epóxi, com número de camadas variando entre duas e quatro, larguras de 30 mm ou 45 mm, e comprimentos de 1000 mm ou 1300 mm. Os ensaios foram realizados em flexão a quatro pontos, seguindo as normas AS/NZS 4063 e BS EN 408. Foram monitorados os deslocamentos no meio do vão com sensores a laser e as deformações nas folhas de CFRP com extensômetros.

A análise dos resultados mostrou que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento significativo na carga última e na rigidez em comparação com as vigas de referência. O aumento na carga variou de 43% a 148%, e a rigidez aumentou entre 31% e 64%. As falhas observadas foram predominantemente por ruptura por tração na madeira ou cisalhamento longitudinal, enquanto o reforço de CFRP não apresentou falha por ruptura, indicando que a capacidade final das vigas foi limitada pelas propriedades da madeira e da interface adesiva. Além disso, verificou-se que maiores comprimentos e larguras de colagem proporcionaram melhor desempenho mecânico, favorecendo modos de ruptura mais dúcteis e controlados.

Tabela 22 - Resultados comparativos entre os valores experimentais e analíticos.

Viga	Pu ¹ Exp. (kN)	Pu Analítico (kN)	Dif. (%) Pu	Mu ² Exp. (kN.m)	Mu Analítico (kN.m)	Dif. (%) Mu
B1	6,82	6,20	+9,0%	1,84	1,67	+10,2%
B2	7,86	7,07	+11,2%	2,12	1,91	+11,0%
B3	11,22	11,45	-2,0%	3,03	3,09	-2,0%
B4	11,91	11,74	+1,4%	3,22	3,17	+1,6%
B5	17,75	19,18	-7,5%	4,79	5,18	-7,5%
B6	14,92	16,42	-9,1%	4,03	4,43	-8,9%
B7	18,29	19,83	-7,8%	4,94	5,35	-7,7%
B8	19,48	17,35	+12,3%	5,26	4,68	+12,4%

Fonte: Adaptado de Vahedian, Shrestha e Crews (2019).

Nota: ¹ Carga última; ² Momento último.

3.2.2.1.11 Avaliação do estudo Rescalvo et al. (2018)

Rescalvo et al. (2018) analisaram experimental e analiticamente a capacidade resistente à flexão de vigas antigas de madeira com defeitos naturais, reforçadas com tiras de compósito de fibra de carbono (CFRP). A motivação central foi avaliar a eficácia desse reforço em elementos estruturais históricos de madeira de *Pinus sylvestris*, com mais de 200 anos de serviço, extraídos da reabilitação da cobertura da Faculdade de Direito da Universidade de Granada. Além disso, o estudo propôs e comparou dois modelos analíticos, o clássico de Bazan-Buchanan e o alternativo de Argüelles, para prever a capacidade de carga à flexão, incorporando os efeitos de nós, fissuras, desvios de grão e outras imperfeições típicas da madeira antiga.

Foram ensaiadas nove vigas com dimensões aproximadas de 75 mm × 140 mm × 1288 mm, das quais três não receberam reforço e seis foram reforçadas com laminados de CFRP colados na face tracionada. Seis vigas foram reforçadas com diferentes tipos de resina epóxi, onde o reforço cobria parcialmente a largura da seção transversal (45 mm de 75 mm), buscando balancear desempenho e custo. Antes dos ensaios principais, foram realizados testes preliminares de aderência e tração dos laminados para selecionar o sistema adesivo mais eficaz.

Os ensaios foram conduzidos em flexão a três pontos, com vão de 1000 mm e carregamento por deslocamento controlado. *Strain gauges* foram aplicados nas faces inferior e lateral das vigas para registrar deformações durante os testes. As vigas apresentavam diferentes graus de defeitos estruturais, como nós centrais e presença de xilófagos, influenciando diretamente o comportamento mecânico (Figura 45). Para viabilizar comparações mais justas entre vigas de diferentes densidades, os autores aplicaram um fator de correção de resistência com base na densidade individual de cada viga em relação à densidade média do conjunto testado.

Figura 45 - Vigas com defeitos após o teste de flexão.



Fonte: Rescalvo *et al.* (2018).

Os resultados mostraram que as vigas reforçadas com CFRP apresentaram aumento significativo da resistência à flexão (MOR), com melhorias variando de 14% a 88% em relação às vigas sem reforço, dependendo do grau de defeitos e da qualidade da madeira base. Em geral, o reforço também promoveu maior rigidez e menor deformação máxima. A maioria das falhas nas vigas reforçadas ocorreu por cisalhamento e delaminação, especialmente nas que possuíam defeitos críticos como grandes nós ou ataque biológico. Quanto à modelagem analítica, o modelo clássico de Bazan-Buchanan apresentou erros médios de até 10,2%, enquanto o modelo de Argüelles - que considera módulos elásticos diferentes em tração e compressão e incorpora coeficientes de área útil com base nos defeitos visuais - obteve desvios médios de apenas 5,6%, revelando-se mais preciso para estimativas em madeiras antigas com grande variabilidade estrutural.

3.2.2.1.12 Avaliação do estudo La Rosa García, De Escamilla e González García (2013)

La Rosa García, De Escamilla e González García (2013) avaliaram o comportamento de vigas de madeira serrada de *Pinus sylvestris* reforçadas com materiais compósitos à base de fibras de carbono (CFRP) e fibras de basalto (BFRP), visando analisar os efeitos de diferentes configurações e gramaturas desses reforços no aumento da capacidade resistente à flexão. O estudo também buscou validar analiticamente os resultados experimentais, utilizando um modelo baseado em comportamento elástico-linear à tração e elastoplástico à compressão para a madeira, considerando o efeito das fibras coladas externamente na região tracionada das vigas.

Foram ensaiadas 26 vigas de madeira, das quais 9 sem reforço (grupo de referência) e 17 com diferentes sistemas de reforço. As vigas apresentavam seção transversal de 78 mm × 155 mm e comprimento de 1090 mm. A madeira utilizada foi classificada conforme a norma UNE 56544, sendo que 12 vigas foram enquadradas na classe C18 e 14 rejeitadas por apresentarem defeitos. Os reforços aplicados foram divididos entre tecidos unidirecionais de fibras de basalto e fibras de carbono, bem como tecidos bidirecionais de carbono aplicados em uma ou duas camadas. O reforço foi disposto em forma de “U”, cobrindo a face inferior e parcialmente as laterais das vigas.

Os ensaios de flexão foram realizados com aplicação de carga pontual no centro do vão de 1 metro entre apoios. O carregamento foi feito de forma controlada até a ruptura, sendo registrados deslocamentos verticais e modos de falha. A maioria das falhas ocorreu por tração nas fibras inferiores da madeira, muitas vezes acompanhadas da ruptura do compósito, o que indicou boa aderência entre o reforço e a madeira. Casos isolados de falha por cisalhamento foram observados em vigas com fendas de secagem ou defeitos naturais. A distribuição dos reforços buscou ser uniforme em relação à classificação das vigas (C18 ou rejeitadas), de forma a manter a comparabilidade dos resultados.

Os resultados experimentais mostraram que todos os sistemas de reforço contribuíram para o aumento da capacidade última das vigas, com destaque para os tecidos bidirecionais de carbono de gramatura 160 g/m², que proporcionaram aumentos superiores a 40% na carga de ruptura em comparação às vigas sem reforço. Os reforços com fibras de basalto também apresentaram bom desempenho, especialmente o FB280, que superou o FB600 em termos de carga máxima, apesar de menor gramatura, devido ao melhor aproveitamento das propriedades da fibra. Por outro lado, reforços com duas camadas não apresentaram ganhos significativos em relação a uma única camada, indicando que o aumento de massa do reforço nem sempre se

traduz em melhor desempenho estrutural. A rigidez também foi favorecida pelos reforços, embora o deslocamento último não tenha sido significativamente aumentado.

3.2.2.1.13 Avaliação do estudo Nadir *et al.* (2016)

Nadir *et al.* (2016) investigaram a eficácia do uso de materiais compósitos à base de fibras de carbono (CFRP) e de vidro (GFRP) na melhoria da rigidez e da resistência à flexão de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) confeccionadas com a madeira *Hevea brasiliensis* (madeira de seringueira). O estudo teve como foco a avaliação comparativa entre vigas não reforçadas e reforçadas com diferentes quantidades de CFRP e GFRP, considerando também o comportamento teórico estimado por modelos de seção transformada para comparação com os dados experimentais.

As vigas foram produzidas a partir de três lamelas de madeira serrada de seringueira, cada uma com 20 mm de espessura, coladas horizontalmente com adesivo PVAc. As dimensões finais das vigas foram de 900 mm de comprimento, 60 mm de altura e 40 mm de largura. Um total de 16 vigas foi ensaiado: 10 não reforçadas e 6 reforçadas com folhas de CFRP ou GFRP aplicadas na face inferior (zona tracionada). Cada grupo de reforço foi subdividido em uma e duas camadas, correspondendo a diferentes porcentagens de área de reforço: 1,67% e 3,33% para o CFRP, e 2,5% e 5% para o GFRP.

Figura 46 - Corpos de prova de madeira preparadas para os testes.



Fonte: Nadir *et al.* (2016).

O processo de aplicação do reforço envolveu a preparação superficial da madeira, aplicação de primer epóxi e colagem manual dos tecidos de fibra, seguidos de cura em prensa por 24 horas e condicionamento por sete dias. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM D198, utilizando o método de flexão a três pontos com carregamento em taxa de 3

mm/min. Foram avaliadas propriedades como rigidez à flexão (EI), momento de ruptura (MOR), capacidade de absorção de energia e índice de ductilidade.

Os resultados mostraram ganhos significativos de desempenho estrutural. A rigidez à flexão aumentou em até 64,12% nas vigas com duas camadas de CFRP e 45,76% nas vigas com duas camadas de GFRP, em comparação às vigas não reforçadas. O módulo de ruptura também apresentou ganhos relevantes: 50,62% para CFRP com duas camadas e 40% para GFRP com duas camadas. Além disso, os índices de ductilidade baseados na energia total absorvida mostraram incrementos superiores a 50% nas vigas com CFRP. A análise teórica baseada na seção transformada mostrou boa concordância com os resultados experimentais, com pequenas variações atribuídas a efeitos de laminação e aderência.

3.2.2.1.14 Avaliação do estudo Rescalvo et al. (2021)

Rescalvo *et al.* (2021) avaliaram o desempenho mecânico de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) confeccionadas com *Populus alba* (Álamo branco) e *Populus tremula* (Álamo tremedor americano), internamente com materiais compósitos de carbono. A pesquisa teve como foco principal melhorar a ductilidade, rigidez e resistência à flexão dessas vigas por meio da inserção de reforços de diferentes tipos, tecido unidirecional e lamelas pultrudadas de CFRP, em distintas posições (zona tracionada, comprimida ou ambas), além de comparar os efeitos de espessura e tipo de reforço em ensaios destrutivos e não destrutivos.

Foram ensaiadas 56 vigas divididas em sete diferentes layouts. O grupo de controle (CH) consistia em vigas sem reforço. Os demais grupos incluíram reforços em diferentes posições e quantidades: tecido de CFRP na base (CFB), tecido de CFRP em duas camadas na base (CF2B), lamela pultrudada na base (CLB), lamela pultrudada no topo (CLT), tecido de CFRP em duas camadas no topo (CF2T) e tecido em ambas as faces (CF2BT). As vigas apresentavam seção de $50 \times 102 \text{ mm}^2$ e comprimento de 2100 mm. A madeira foi cuidadosamente selecionada com base em ensaios de ressonância para garantir uniformidade da classe T8 de resistência, com módulo de elasticidade dinâmico médio de 7061 MPa.

Os ensaios incluíram testes de ressonância transversais (não destrutivos) para obtenção do módulo dinâmico antes e depois da inserção do reforço, além de ensaios de flexão a quatro pontos conforme norma UNE-EN 408, com instrumentação por extensômetros e LVDT para medição de tensões, deslocamentos e cálculo dos módulos estáticos de elasticidade e resistência máxima. A ductilidade foi analisada sob três abordagens distintas: deslocamento $\times$ segurança

estrutural, deslocamento x projeto e curvatura x projeto, com uso de um script em Python para definição automática dos pontos de escoamento e ruptura.

Os resultados revelaram que os melhores desempenhos em rigidez, resistência e ductilidade foram obtidos quando os reforços foram aplicados na zona tracionada. Em especial, o layout lamela pultrudada na base (CLB) apresentou os maiores incrementos: até 44% no módulo de elasticidade estático e 33% na tensão máxima. A adição de tecido de carbono em ambas as faces (CF2BT) também mostrou bom desempenho global, embora com menor ductilidade. Em contraste, reforços apenas na zona comprimida resultaram em comportamento predominantemente frágil, sem ganho significativo de ductilidade. As análises estatísticas confirmaram que a espessura e a posição do reforço são fatores decisivos para o desempenho estrutural.

3.2.2.1.15 Avaliação do estudo de Yang et al. (2016a)

Yang et al. (2016a) investigaram o comportamento estrutural de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com barras de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), com ênfase na aplicação de pré-tração (*prestress*). O estudo comparou a eficiência de reforços passivos e ativos (com pré-tração) sobre a rigidez e a capacidade de carga à flexão de vigas de madeira de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir), além de validar um modelo teórico que estimasse esses parâmetros de forma conservadora e eficaz.

Foram ensaiadas doze vigas com 6 metros de comprimento e seção de 75 mm $\times$ 300 mm, divididas em quatro grupos com três réplicas cada: (i) vigas sem reforço (controle), (ii) vigas com reforço passivo na parte inferior (barras de 11 mm), (iii) vigas com reforço pré-tracionado na parte inferior (barras de 16 mm), e (iv) vigas com reforço pré-tracionado na parte inferior e reforço passivo na parte superior (barras de 16 mm e 11 mm, respectivamente). As barras de CFRP foram embutidas longitudinalmente nas vigas com uso de adesivo epóxi e ancoragens com porcas para permitir o reaperto, evitando perda de pré-tração durante a cura.

Os ensaios foram conduzidos em configuração de flexão a quatro pontos conforme a norma BS EN 408:2010, com taxa de carregamento de 5 mm/min até a ruptura. O comportamento das vigas foi monitorado por LVDTs e extensômetros distribuídos ao longo da seção, permitindo a avaliação das deformações e da posição do eixo neutro. As falhas observadas variaram conforme a configuração: vigas sem reforço romperam por tração frágil na madeira, as com reforço passivo e pré-tracionado falharam por compressão mais dúctil, e as

com reforço duplo apresentaram falha por flexão-cisalhamento, destacando a influência da configuração de reforço no modo de ruptura.

Os resultados demonstraram que o uso de CFRP trouxe ganhos significativos. A resistência à flexão aumentou em 64,8% nas vigas com reforço passivo, 93,3% nas vigas pré-tensionadas e 131% nas vigas com reforço duplo. Já a rigidez à flexão aumentou em 18,7%, 33,2% e 42,3%, respectivamente. O modelo teórico proposto mostrou boa concordância com os valores experimentais, com discrepâncias inferiores a 13,5% na capacidade última e inferiores a 8% na rigidez. A introdução de pré-tração também melhorou a distribuição de tensões, adiando a falha por tração e promovendo falhas por compressão mais controladas.

3.2.2.1.16 Avaliação do estudo de Fossetti, Minafò e Papia (2015)

Fossetti, Minafò e Papia (2015) analisaram o comportamento à flexão de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com cordões de materiais compósitos de fibras, especificamente fibras de carbono (CFRP), vidro (GFRP) e basalto (BFRP). O estudo observou a eficiência da técnica de reforço com cordões embutidos longitudinalmente, como alternativa mais econômica e aplicável em campo em comparação às tradicionais barras pultrudadas. Além disso, os autores desenvolveram um modelo analítico capaz de estimar a rigidez e o comportamento elástico das seções reforçadas, validando-o com os dados experimentais.

O programa experimental foi dividido em duas séries. A Série 1 envolveu 15 vigas em escala reduzida (80×130 mm, 1000 mm de comprimento), com cinco diferentes configurações (sem reforço, com CFRP ou GFRP e dois tipos de adesivo: resina epóxi ou cola melamínica). Três amostras foram testadas para cada configuração. Os cordões de reforço tinham 8 mm de diâmetro e foram embutidos na face inferior das vigas, em canais retangulares de 15×15 mm. A Série 2 foi composta por oito vigas em escala real (80×160 mm, 3400 mm de comprimento), sendo três vigas sem reforço, três reforçadas com cordões de GFRP e duas com barras de BFRP (7 mm de diâmetro), também embutidas na face inferior.

Os ensaios foram realizados em flexão a quatro pontos. Na Série 1, os testes foram feitos em máquina universal com capacidade de 600 kN, enquanto na Série 2 foi utilizado um sistema com estrutura de reação e atuador hidráulico de 400 kN. A instrumentação incluiu LVDTs para medição das deflexões no meio do vão e célula de carga para monitoramento da força aplicada. As vigas não reforçadas apresentaram falha por deslizamento entre as lamelas, com colapso frágil localizado nas zonas de tração. Já as vigas reforçadas apresentaram comportamento não

linear, com falhas por delaminação, perda de aderência e, em alguns casos, compressão do topo da madeira.

Os resultados mostraram que os reforços com GFRP e CFRP na Série 1 não trouxeram ganhos significativos de resistência ou ductilidade, devido a problemas do adesivo e ao uso excessivo de resina. Entretanto, as vigas reforçadas com barras de basalto na Série 2 apresentaram desempenho superior: aumento médio de 25% na carga máxima e cerca de 40% na ductilidade, em comparação às vigas não reforçadas. O modelo analítico proposto se mostrou eficaz em prever o comportamento elástico das vigas, com razão entre rigidez analítica e experimental de 1,12 para a Série 1 e 0,94 para a Série 2. Isso demonstra que o modelo é confiável na estimativa da rigidez, embora não capture completamente os efeitos de delaminação e falhas por deslizamento.

Tabela 23 - Comparativo entre os resultados experimentais e analíticos.

Série	Tipo de Viga	Pico de Carga (kN)	Deslocamento Máx. (mm)	Rigidez Exp. (kN/mm)	Rigidez Teórica (kN/mm)	Razão Teórica/Exp.
1	Sem reforço (S)	75	15	9,51	10,65 (estimado)	1,12
1	SCR (CFRP + epóxi)	65	11	10,02	11,22	1,12
1	SVR (GFRP + epóxi)	65	13	8,52	9,54	1,12
2	Sem reforço (H)	27	44	0,58	0,55 (estimado)	0,94
2	HV (GFRP + epóxi)	24	48	0,51	0,48	0,94
2	HB (Basalto + epóxi)	34	65	0,65	0,61	0,94

Fonte: Adaptado de Fossetti, Minafò e Papia (2015).

3.2.2.1.17 Avaliação do estudo de Raftery e Kelly (2015)

O objetivo do estudo conduzido por Raftery e Kelly (2015) foi investigar a eficácia do uso de barras de polímero reforçado com fibras de basalto (BFRP) como tecnologia de reforço e reparo para vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) de baixa qualidade. A pesquisa avaliou o comportamento à flexão de vigas não reforçadas, reforçadas e artificialmente fraturadas que foram posteriormente reparadas, utilizando BFRP embutidos em canais circulares, com foco em variáveis como rigidez, capacidade última de momento fletor, perfil de deformações e modo de falha.

O programa experimental consistiu em 30 vigas divididas em seis grupos (Fases A a F), com cinco réplicas cada. As vigas foram confeccionadas com madeira de *Picea sitchensis* (Abeto sitka), coladas com adesivo de fenol resorcinol formaldeído e apresentavam 3610 mm de comprimento, 190 mm de altura e seção transversal composta por cinco lamelas. Os testes foram realizados considerando a flexão a 4 pontos. A Fase A envolveu vigas sem reforço (controle), a Fase B com barras de BFRP no "*soffit*" (base inferior), e a Fase C com BFRP instalados nas laterais. Já as Fases D, E e F consistiram em vigas artificialmente fraturadas e posteriormente reparadas, com o reforço aplicado na base (E) ou nas laterais (F), simulando intervenções típicas em elementos estruturais danificados.

Os resultados experimentais demonstraram que a aplicação dos reforços de BFRP aumentou significativamente a capacidade resistente das vigas, especialmente quando posicionados na base (Fase B), com acréscimo médio de 23,1% no momento fletor último e até 10,3% na rigidez local. As vigas reparadas após fratura artificial (Fase E) também superaram as vigas não reforçadas, com aumento médio de 18,4% na capacidade resistente. Já os reforços nas laterais (Fases C e F), embora esteticamente mais discretos, foram menos eficientes por estarem posicionados mais próximos do eixo neutro. Além disso, o estudo validou a boa aderência entre BFRP e madeira, observando falhas por compressão e fissuração progressiva, e não por descolamento prematuro. A distribuição de deformações indicou melhor aproveitamento das características compressivas da madeira nas vigas reforçadas.

3.2.2.1.18 Avaliação do estudo de Yang et al. (2016b)

Yang et al. (2016b) investigaram o comportamento à flexão de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com materiais de alta resistência, como barras de aço e diferentes configurações de reforços em FRP (polímero reforçado com fibras). O foco principal foi avaliar os efeitos do tipo de material de reforço, da razão de armadura e da disposição do reforço sobre a rigidez e resistência das vigas, além de propor e validar um modelo teórico capaz de prever a capacidade resistente e a rigidez das vigas reforçadas.

O estudo envolveu 46 vigas de madeira de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir), todas com seção transversal de 75 × 300 mm e 6 metros de comprimento, divididas em 16 séries distintas. As configurações incluíam vigas sem reforço (controle), com barras de GFRP (fibra de vidro), com barras de aço, com placas horizontais e verticais de GFRP e CFRP (fibra de carbono), e com reforços tanto na zona tracionada quanto na comprimida. As taxas de reforço

variaram de 0,267% a 1,992%, e os reforços foram aplicados por colagem com resina epóxi após preparo das superfícies.

Os ensaios foram conduzidos em configuração de flexão a quatro pontos, com vão de 5,7 m e carregamento monotônico até a ruptura. O monitoramento incluiu LVDTs e extensômetros ao longo da altura da seção para registrar deflexões e distribuição de deformações. As vigas sem reforço apresentaram falha frágil por tração na madeira, enquanto vigas moderadamente reforçadas (especialmente com CFRP e aço) falharam por compressão, com comportamento mais dúctil. O uso de reforço nas duas faces (tracionada e comprimida) não trouxe ganhos adicionais expressivos na capacidade última devido a flambagem prematura do reforço em compressão.

Tabela 24 - Resultados comparativos encontrados para a rigidez à flexão e momento último.

Série	EI ¹ Exp. (10 ¹² · mm ²)	EI Teórico (10 ¹² N·mm ²)	Diferença EI (%)	Mu ² Exp. (kN·m)	Mu Teórico (kN·m)	Diferença Mu (%)
C	2,06	1,82	-11,7%	48,3	40,7	-15,7%
GR0.5	2,12	1,86	-12,5%	53,8	52,6	-2,2%
GR1.0	2,10	1,90	-9,7%	54,5	54,7	+0,5%
GR1.8	2,16	1,99	-7,7%	61,8	59,1	-4,4%
GR1.8 + 0.5	2,19	2,04	-6,6%	64,8	61,5	-5,1%
SR1.0	2,43	2,59	+6,6%	64,0	68,8	+7,6%
SR1.8	2,62	3,19	+21,8%	69,8	78,2	+12,0%
GP0.27	1,94	1,88	-2,9%	47,4	53,3	+12,3%
GP0.53	2,01	1,95	-2,9%	55,0	55,7	+1,4%
GP0.80	2,10	2,02	-3,9%	53,6	58,0	+8,2%
GP0.53+0.27	2,06	2,02	-2,0%	54,3	58,2	+7,2%
CP0.67	2,08	2,20	+5,7%	58,4	64,0	+9,6%
CP-V0.33	2,18	2,01	-8,0%	64,6	61,9	-4,2%
CP-V0.66	2,13	2,19	+3,0%	75,5	68,8	-8,8%
CP-V0.99	2,17	2,38	+9,9%	71,4	75,2	+5,3%
CP-V0.66+0.66	2,44	2,57	+5,5%	73,3	68,8	-6,0%

Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2016).

Nota: ¹ Rigidez à flexão; ² Momento último.

Os resultados demonstraram aumentos significativos na resistência à flexão (até 56,3%) e na rigidez (até 27,5%) para algumas configurações. O reforço com placas verticais de CFRP

foi o mais eficaz, enquanto reforços com GFRP apresentaram desempenho inferior. O modelo teórico proposto previu os resultados com boa acurácia, com diferença inferior a 10% na maioria dos casos. O estudo também conduziu uma análise paramétrica para determinar a influência de variáveis como a posição e rigidez axial do reforço sobre o comportamento estrutural das vigas.

3.2.2.1.19 Conclusões das investigações de trabalhos experimentais

Com base na ampla revisão dos trabalhos analisados, observa-se que a aplicação de materiais compósitos, como CFRP, GFRP, BFRP e outros reforços poliméricos, tem sido extensivamente explorada como solução para aumentar a capacidade resistente, a rigidez e a ductilidade de vigas de madeira. Esses estudos demonstram que a inserção de reforços, tanto externa quanto internamente, proporciona ganhos expressivos no desempenho estrutural, especialmente quando aplicados nas zonas mais solicitadas, como a face tracionada. Além disso, a variedade de configurações e técnicas de colagem analisadas em diferentes pesquisas evidencia o potencial de personalização do reforço conforme a demanda estrutural específica.

Apesar desses avanços, é evidente a lacuna existente no que diz respeito à utilização de armaduras de aço passivas como técnica de reforço em vigas de madeira. Embora o aço apresente características mecânicas superiores e um histórico consolidado em estruturas de concreto, sua aplicação na madeira ainda é pouco investigada de maneira sistemática. O uso de barras de aço pode oferecer vantagens importantes, como maior compatibilidade com sistemas construtivos híbridos e maior resistência ao impacto térmico, o que sugere um campo fértil para futuras pesquisas e validações experimentais.

Outro ponto crítico é a escassez de estudos que abordam o comportamento das vigas de madeira reforçadas sob condições de incêndio. Considerando que a madeira é um material combustível e que o desempenho ao fogo é um dos critérios determinantes em projetos de segurança estrutural, a ausência de dados consolidados sobre a influência dos reforços no tempo de resistência ao fogo limita a aplicabilidade segura dessas soluções em edificações. Portanto, torna-se fundamental direcionar esforços científicos para entender como os diferentes materiais de reforço interagem com a madeira em altas temperaturas e de que forma contribuem para prolongar a integridade estrutural durante um incêndio.

3.2.2.2 Análise e discussão dos estudos numéricos selecionados

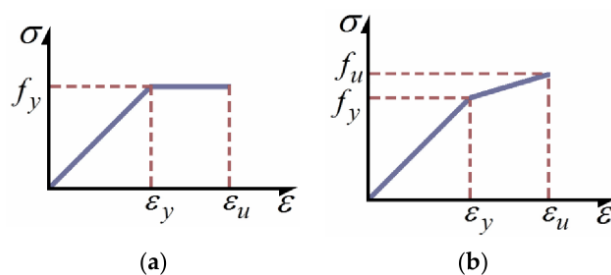
3.2.2.2.1 Avaliação do estudo de Christoforo *et al.* (2022)

Christoforo *et al.* (2022) desenvolveram uma análise paramétrica de 164 vigas de madeira reforçadas com barras de aço por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM), dentro do escopo de análises físicas e geométricas lineares e não-lineares. O foco principal foi identificar a influência de variáveis como vão, base, altura e taxa de armadura no desempenho estrutural das vigas de madeira, dentro das linhas limítrofes do estado limite de serviço e do estado limite último.

Além disso, a metodologia previu a utilização de análise de variância (ANOVA) e modelos de regressão múltipla, também avaliados por meio de ANOVA. A análise computacional permitiu investigar diferentes configurações de reforço sem a necessidade de ensaios físicos extensivos. Verificou-se que a rigidez e a capacidade de carga das vigas aumentam proporcionalmente à quantidade de barras utilizadas e à sua posição próxima à zona tracionada da seção transversal. Os resultados mostraram coerência com dados experimentais disponíveis na literatura.

Para a madeira, foi adotado nas simulações numéricas o critério de falha de Hill, uma vez que este é uma extensão do critério de Von Mises e considera a anisotropia dos materiais, invólucro ao sistema cartesiano (Figura 45b). No critério de Hill, os planos X, Y e Z são respectivamente as direções longitudinal, radial e tangencial da madeira, apresentando bons resultados em simulações que contemplam a plasticidade anisotrópica de Hill. Para o aço, foi adotado o critério de Von Mises, comumente utilizado para verificação de falhas em materiais dúcteis. O Modelo constitutivo adotado para as barras de aço foi o elástico-perfeitamente plástico (Figura 45a) com uma consideração de uma inclinação de redução de curva para evitar possíveis instabilidades.

Figura 47 - Modelos constitutivos: (a) reforço do aço; (b) madeira.



Fonte: Christoforo *et al.* (2022).

Os dados obtidos indicam que os modelos numéricos desenvolvidos foram eficazes na representação do comportamento estrutural de vigas com e sem reforço de barras de aço, abrangendo tanto as etapas lineares quanto não lineares da resposta mecânica. Os modelos evidenciaram concentrações de tensões em regiões compatíveis com os locais de ruptura observados nos ensaios experimentais, o que reforça a validade das simulações realizadas. Os resultados encontrados estão sintetizados na [Tabela 22](#).

Os autores destacam a eficácia da simulação numérica como ferramenta para prever e otimizar reforços em estruturas de madeira. O estudo contribui com diretrizes para o projeto de vigas reforçadas e reforçam a importância do refinamento do modelo conforme o tipo de madeira e condições de ligação.

Tabela 25 - Sintetização dos resultados de Christoforo *et al.* (2022).

Aspecto Avaliado	Taxa de reforço		Observações gerais
	2%	4%	
Aumento da carga de serviço	32,00%	49,00%	Permite uso de seções menores, útil em projetos com restrições arquitetônicas
Aumento da carga última	42,90%	66,90%	Indica comportamento mais dúctil
Redução do deslocamento médio	- 4,50%	- 16,60%	Modelos com maior reforço apresentam maiores forças e menores deslocamentos últimos

Fonte: Christoforo *et al.* (2022).

3.2.2.2.2 Avaliação do estudo de Nubissie, Ngamie e Woafu (2011)

Nubissie, Ngamie e Woafu (2011) apresentaram um modelo numérico e analítico para prever o comportamento dinâmico de uma viga de madeira submetida a carga e ao fogo, com base na curva de temperatura da norma ISO 834. Utilizando equações diferenciais com coeficientes variáveis, o modelo simula a evolução das propriedades mecânicas e térmicas da viga ao longo do tempo. As análises levaram à previsão do tempo até a falha estrutural.

Os autores trazem em seu trabalho as diferenças equacionais que regem o comportamento dinâmico de uma viga de madeira tanto em temperatura ambiente ([Equação 15](#)), quanto quando da mudança das propriedades termomecânicas em função da influência do fogo ([Equação 16](#)).

$$\rho S \left(\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \right) + EI \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} \right) = f_m(t) \quad (15)$$

$$\rho_{(x,t,T)} S_{(x,t,T)} \left(\frac{\partial^2 W_{(x,t,T)}}{\partial t^2} \right) + E_{(x,t,T)} I_{(x,t,T)} \left(\frac{\partial^4 W_{(x,t,T)}}{\partial x^4} \right) = f_m(t) \quad (16)$$

Onde W é o deslocamento da estrutura, I é o momento de inércia da peça, E é o módulo de elasticidade, ρS é a massa por unidade de comprimento, f_m é a excitação externa, t é o tempo e x é a posição ao longo da viga. A excitação externa pode ser oriunda de uma carga constante, senoidal, móvel ou ainda estocástica. O artigo considerou casos de carga senoidal e constante.

Os resultados mostraram que o aumento de temperatura leva à perda gradual da rigidez e ao aumento das deflexões. A taxa de deformação acelera consideravelmente após os primeiros 10 minutos de exposição ao fogo. O modelo demonstrou ser capaz de prever, com boa precisão, a falha estrutural da viga, validando-se frente a dados experimentais de referência. Além disso, o estudo comparou diferentes tipos de carga (constante e senoidal), observando comportamentos distintos.

3.2.2.2.3 Avaliação do estudo de Mascia e Simoni (2013)

Mascia e Simoni (2013) foi analisar e comparar a aplicação de diferentes critérios de ruptura a materiais ortotrópicos, com foco específico em duas espécies brasileiras de madeira: *Pinus elliottii* e *Goupia glabra*. O estudo visou determinar quais dos critérios teóricos analisados (Hill, Tsai-Hill, Hoffman, Tsai-Wu e Norris) fornecem previsões mais confiáveis da resistência ao esforço combinado de tensão, compressão e cisalhamento, comparando os envelopes de ruptura obtidos teoricamente com resultados experimentais provenientes de testes biaxiais, cisalhamento puro e uniaxiais fora do eixo.

O critério de Hill, originalmente formulado para materiais isotrópicos, foi adaptado para considerar a anisotropia da madeira. A equação geral em estado plano de tensões é dada pela [Equação 17](#):

$$\frac{r_1^2}{f_{t1}^2} + \frac{r_2^2}{f_{t2}^2} - \left(\frac{1}{f_{t1}^2} + \frac{1}{f_{t2}^2} - \frac{1}{f_{t3}^2} \right) r_1 r_2 + \frac{s_{12}^2}{f_{v4}^2} = 1 \quad (17)$$

Esse critério assume igual resistência à tração e à compressão e, portanto, não é adequado para materiais com comportamento assimétrico, como a madeira. Serve, principalmente, como base para o desenvolvimento de critérios mais avançados, como Tsai-Hill e Hoffman.

O critério de Tsai-Hill é uma simplificação do de Hill, formulado para materiais ortotrópicos transversais, assumindo resistências iguais nas direções 2 e 3 (Equação 18).

$$\frac{r_1^2}{f_{t1}^2} + \frac{r_2^2}{f_{t2}^2} - \frac{r_1 r_2}{f_{t1}^2} + \frac{s_{12}^2}{f_{v4}^2} = 1 \quad (18)$$

A principal limitação desse critério é a ausência de diferenciação entre resistências à tração e compressão, o que exige substituições manuais conforme o sinal das tensões aplicadas, tornando a análise mais trabalhosa e sujeita a erros, especialmente em simulações computacionais.

O critério de Hoffman introduz termos lineares nas tensões normais para lidar com a diferença entre tração e compressão. Sua equação no plano de tensões pode ser expressa pela Equação 19:

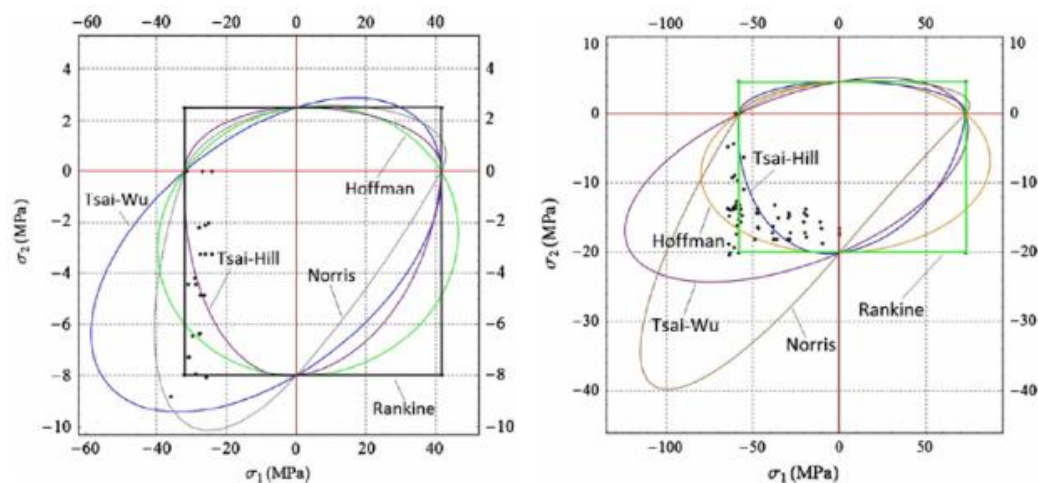
$$\frac{r_1^2}{f_{t1} f_{c1}} + \frac{r_2^2}{f_{t2} f_{c2}} - \frac{r_1 r_2}{f_{t1} f_{c1}} + \frac{s_{12}^2}{f_{v4}^2} + \left(\frac{f_{c1} - f_{t1}}{f_{t1} f_{c1}} \right) r_1 + \left(\frac{f_{c2} - f_{t2}}{f_{t2} f_{c2}} \right) r_2 = 1 \quad (19)$$

Essa equação representa um avanço relevante sobre os critérios anteriores, pois permite a construção de superfícies de ruptura mais próximas do comportamento real da madeira, especialmente em estados de compressão. Além disso, demonstrou boa aderência com os resultados experimentais no estudo.

Os resultados indicaram que os critérios de Tsai-Hill e Hoffman apresentaram os melhores ajustes com os dados experimentais, especialmente no terceiro quadrante (compressão-compressão), com o Hoffman ligeiramente superior. O critério de Tsai-Wu também forneceu superfícies elipsoidais estáveis e adequadas, mas exigiu maior número de parâmetros experimentais para calibração. O critério de Norris, embora historicamente associado à madeira, superestimou a resistência em estados de compressão, tornando-se inadequado para algumas situações de projeto.

Finalmente, o estudo demonstrou a importância da construção de envelopes de ruptura bidimensionais e tridimensionais para a análise precisa de elementos estruturais de madeira. O uso do software Mathematica permitiu gerar visualizações úteis para comparação entre critérios e tomada de decisão em projetos estruturais (Figura 48). Os autores destacam que, entre os critérios analisados, o de Hoffman se mostrou o mais robusto para prever falhas em madeiras tropicais brasileiras, como *Pinus elliottii* e *Goupia glabra*.

Figura 48 Dados experimentais e comparação dos envelopes de ruptura para o *Pinus elliottii* (esquerda) e *Goupia glabra* (direita).



Fonte: Adaptado de Mascia e Simoni (2013).

3.2.2.2.4 Avaliação do estudo de Khelifa et al. (2015)

Khelifa *et al.* (2015) avaliaram numericamente o comportamento à flexão de vigas de madeira sólida reforçadas externamente com folhas de CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer). Utilizando elementos finitos tridimensionais, os autores buscaram validar o modelo numérico com base em resultados experimentais existentes, além de explorar, por meio de estudo paramétrico, o efeito de diferentes números e comprimentos de camadas de CFRP na capacidade resistente e rigidez das vigas.

O estudo utilizou como base experimental sete vigas de madeira maciça com seção quadrada de 200×200 mm e comprimento total de 4000 mm, das quais três (CT#1 a CT#3) não foram reforçadas e quatro foram reforçadas com duas ou três camadas de CFRP coladas na face tracionada. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão em quatro pontos com vão livre de 3600 mm, sendo as deflexões medidas por LVDTs posicionados no meio do vão. A madeira utilizada apresentava teor de umidade médio de 10,88% e densidade de 453,6 kg/m³. A adesão entre CFRP e madeira foi feita com adesivo epóxi de dois componentes, cujas propriedades foram detalhadas com base na literatura e ficha técnica do fabricante.

O modelo numérico foi desenvolvido em software de elementos finitos utilizando elementos sólidos para a madeira (C3D8R) e elementos de casca para o CFRP (S4R), com interação coesiva entre as superfícies via modelo de zona coesiva (CZM). O comportamento da madeira foi modelado como ortotrópico elasto-plástico com dano, considerando os efeitos de anisotropia e a evolução do dano sob compressão e tração. Já o CFRP foi considerado como

material elástico isotrópico. A validação mostrou boa concordância entre os resultados experimentais e as simulações, tanto em termos de rigidez quanto na carga última e modo de falha, especialmente ao utilizar um módulo elástico longitudinal de 14,5 GPa para a madeira.

Os resultados mostraram que a adição de CFRP elevou significativamente a capacidade de carga das vigas: as com duas camadas apresentaram aumento médio de 41,82%, e aquelas com três camadas, de 60,24%, em relação às vigas não reforçadas. O modelo numérico previu cargas últimas com erro máximo de 1,2% para as vigas com duas camadas de CFRP. Além disso, observou-se que o número de camadas tem influência direta sobre a carga resistente, enquanto o comprimento do reforço teve influência desprezível na resposta carga-deflexão, indicando que reforços com menores comprimentos podem ser eficazes em aplicações práticas.

3.2.2.2.5 Conclusões das investigações dos trabalhos numéricos

As investigações numéricas avaliadas demonstram a simulação computacional como ferramenta eficiente para compreender e otimizar o comportamento estrutural de elementos de madeira. O estudo de Christoforo *et al.* (2022) evidenciou a eficácia do Método dos Elementos Finitos na análise paramétrica de vigas reforçadas com barras de aço, considerando aspectos geométricos e materiais em estados limites de serviço e último. A inclusão de análises estatísticas (ANOVA e regressão) reforça a robustez dos resultados, os quais mostraram aumentos relevantes em capacidade de carga e rigidez proporcionalmente à taxa de reforço adotada. O uso do critério de Hill para a madeira e de Von Mises para o aço permitiu uma modelagem mais precisa da anisotropia e da plasticidade envolvidas.

Complementando essa abordagem, o estudo de Nubissie, Ngamie e Wofo (2011) ampliou a compreensão do comportamento de vigas de madeira sob ação térmica. Por meio de um modelo baseado em equações diferenciais com coeficientes variáveis dependentes do tempo e da temperatura, os autores conseguiram simular a degradação térmica da madeira em incêndios, considerando a norma ISO 834. Essa análise permitiu prever com boa precisão o tempo até a falha estrutural, além de demonstrar a importância da variação espacial e temporal das propriedades termomecânicas do material. Já Mascia e Simoni (2013) trouxeram uma importante contribuição ao comparar diferentes critérios de ruptura aplicados à madeira, concluindo que o critério de Hoffman apresentou melhor aderência aos resultados experimentais para diferentes espécies, sobretudo por considerar a diferença entre resistências à tração e compressão, um aspecto crítico para a análise de materiais ortotrópicos.

Finalmente, o trabalho de Khelifa *et al.* (2015) reafirma a importância das simulações numéricas calibradas com ensaios experimentais para prever o desempenho de vigas reforçadas com materiais compósitos, como o CFRP. A combinação entre modelagem tridimensional, zona coesiva e elementos ortotrópicos permitiu resultados altamente confiáveis, com erro inferior a 2% em alguns casos. A influência significativa do número de camadas de reforço na capacidade de carga, somada à baixa sensibilidade quanto ao comprimento do reforço, fornece subsídios valiosos para o dimensionamento mais eficiente e econômico de intervenções em madeira. Em conjunto, os quatro estudos reforçam que as ferramentas numéricas, quando bem fundamentadas em critérios teóricos e dados experimentais, constituem uma base sólida para a inovação e a segurança em estruturas de madeira reforçada.

3.2.2.3 Análise e discussão dos estudos experimentais e numéricos selecionados

3.2.2.3.1 Avaliação do estudo de Wdowiak-Postulak (2023)

Wdowiak-Postulak (2023) avaliou o desempenho estático de vigas de madeira reforçadas com barras pré-tracionadas de aço, basalto e vidro, utilizando métodos numéricos, teóricos e experimentais.

Foram ensaiadas 45 vigas da madeira Scaninavian Spruce em escala técnica sob carregamento de quatro pontos. As vigas foram classificadas em 5 séries, com tipos diferentes de reforços com barras de Ø10mm pré tensionadas, conforme sintetizado na [Tabela 23](#).

Tabela 26 - Classificação das vigas por série.

Série	Tipo de viga	Reforço	Pré-Tensionamento	Vigas
A	Viga lamelada colada sem reforço	Nenhum	Não se aplica	9
B	Viga lamelada colada	Barra de aço colada	15 kN	9
C	Viga lamelada colada	Barra de basalto	15 kN	9
D	Viga lamelada colada	Barra de vidro	15 kN	9
E	Viga maciça colada/ juntas cunha	Barra de aço	15 kN	9

Fonte: Wdowiak-Postulak (2023).

A comparação entre os resultados teóricos, experimentais e numéricos revelou uma excelente concordância entre os modelos matemáticos desenvolvidos e os dados obtidos em laboratório. A distribuição de tensões nas vigas reforçadas, tanto de madeira quanto de aço e materiais compósitos, mostrou-se coerente entre os diferentes métodos de análise. Isso reforça

a confiabilidade da modelagem numérica e valida seu uso como ferramenta de previsão do comportamento estrutural de vigas de madeira reforçadas.

Os resultados conclusivos do trabalho mostraram aumentos significativos de desempenho em todas as tipologias de reforço. As vigas lameladas reforçadas com aço apresentaram ganho na capacidade de carga, enquanto aquelas com barras de basalto e vidro alcançaram resultados expressivos. A rigidez e ductilidade também foram beneficiadas em todos as séries (Tabela 24).

Destaca-se a eficácia do uso de barras de aço e compósitos como reforço em vigas de madeira, contribuindo para o aumento da capacidade de carga, rigidez e ductilidade. A investigação concluiu que o reforço com barras pré-tracionadas, independentemente do material, é uma estratégia eficiente para melhorar o desempenho estrutural da madeira, juntamente a boa correlação dos resultados dos modelos teóricos e numéricos em relação aos dados experimentais, sendo recomendados para o dimensionamento de reforços na prática.

Tabela 27 - Resumo comparativo dos efeitos dos reforços nas vigas de madeira.

Tipo de Reforço	Tipo de Viga	Aumento da Capacidade de Carga (%)	Aumento da Rigidez (%)	Observações Complementares
Aço pré-tracionado (inferior/lateral)	Lamelada colada	34,41%	13,15%	Redução da propagação de trincas e da tensão normal na madeira.
Aço pré-tracionado	Maciça	19,55%	8,11%	Tensão de tração aumentada na falha; trincas reduzidas e limitadas a uma zona estreita.
Barra de basalto	Lamelada colada	31,12%	9,91%	Alta resistência, leveza, durabilidade e resistência química.
Barra de vidro	Lamelada colada	29,04%	9,70%	Boa adesão em alguns casos; menor custo em relação ao aço.

Fonte: Wdowiak-Postulak (2023).

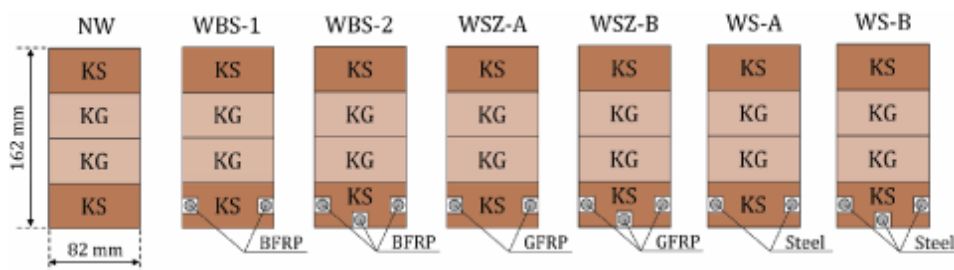
3.2.2.3.2 Avaliação do estudo de Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025)

Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025) por meio de ensaios experimentais e modelagem numérica a quatro pontos, investigaram o desempenho de vigas de madeira de coníferas (Pinheiro e Abeto) em tamanho estrutural reforçadas com barras de aço, BFRP e GFRP em diferentes configurações conforme a Figura 49.

Segundo o estudo, houve uma melhoria na rigidez e na capacidade de carga das vigas reforçadas com barras de aço convencionais (*Steel*) e melhorias intermediárias nas vigas

reforçadas com BFRP e GFRP. Os autores propuseram ensaiar as vigas de madeira até a falha final dos elementos de madeira, constatando que a falha final ocorreu de forma corriqueira na zona de tração por meio de rachaduras em defeitos da madeira, como nós ([Figura 50](#)), e eram procedidas de falhas posteriores na zona de compressão.

Figura 49 - Arranjo dos reforços utilizados nos corpos de prova.



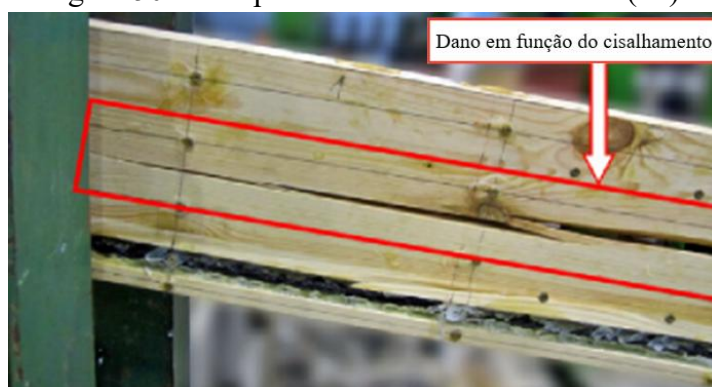
Fonte: Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025).

Observou-se que os reforços contribuíram para um atraso na propagação das fissuras iniciais, permitindo uma redistribuição mais eficaz das tensões internas. Essa redistribuição favoreceu o aumento do tempo até a falha completa, especialmente nas vigas com reforço metálico. As vigas com reforço em compósitos poliméricos, apesar de apresentarem desempenho inferior ao aço, ainda mostraram ganhos importantes em relação às vigas não reforçadas. Além disso, o tipo e o posicionamento do reforço influenciaram diretamente no modo de ruptura e na capacidade de absorção de energia das vigas. Esses resultados evidenciam o potencial dos reforços para melhorar a segurança estrutural e a durabilidade das vigas de madeira sob cargas elevadas.

O programa experimental conduzido pelos autores obteve dados suficientes para lastrear o estudo computacional por meio do método dos elementos finitos (FEM), baseado no critério de escoamento ortotrópico de Hill para madeira e superfície coesiva para o comportamento adesivo. O modelo foi validado com resultados ([Tabela 25](#)) que expressaram com precisão o comportamento das peças submetidas ao laboratório (Wdowiak-Postulak e Kawecki 2025).

O modelo numérico baseado no critério de Hill foi validado com sucesso e previu com precisão a carga de falha, deflexão e os modos de colapso em compressão, tração e cisalhamento. Também foi observada boa correlação entre os resultados experimentais e as simulações, com erro relativo abaixo de 12%. O estudo mostrou que o reforço com barras compósitas pode aumentar o desempenho de vigas de madeira e que a modelagem numérica é uma ferramenta eficaz para prever seu comportamento estrutural.

Figura 50 - Rompimento na falha da madeira (nó).



Fonte: Adaptado de Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025).

Tabela 28 - Resultados experimentais e numéricos: validação do modelo numérico.

Grupo	Experimental			MEF (kN)	Experimental			MEF (mm)
	$\frac{P_{max}}{2}$ (kN) ¹	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)		$\frac{w_{max}}{2}$ (mm) ¹	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	
NW	19,00	17,00	2,60	17,70	75,80	62,50	12,40	67,50
WBS-1	21,50	19,40	1,60	19,40	82,30	69,30	13,60	73,30
WBS-2	24,00	21,70	1,50	20,80	96,20	81,70	13,40	77,90
WSZ-A	21,00	18,80	1,70	18,80	77,90	66,10	8,60	71,00
WSZ-B	22,00	19,80	1,70	19,60	76,20	67,20	7,90	73,30
WS-A	25,00	21,80	2,90	20,10	78,40	68,00	8,20	67,60
WS -B	25,00	23,80	1,00	22,90	77,40	73,00	4,20	80,40

Fonte: Adaptado de Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025).

Nota: ¹ Os resultados de $P_{max}/2$ e $w_{max}/2$ expressos na tabela, condizem ao maior valor encontrado pelos autores para a série durante os testes experimentais.

Tabela 29 - Comparativo da rigidez e da força de ruptura por tipo de reforço.

Grupo	Inclinação da linha/rigidez da viga (kN/mm)	Aumento percentual da rigidez da viga em relação ao corpo de prova de referência (%)	Força de falha no modelo de elementos finitos (KN)	Aumento percentual da força de ruptura em relação ao corpo de prova de referência (%)
NW	0,33072	-	17,70	-
WBS-1	0,35787	8,20	19,40	9,60
WBS-2	0,37777	14,20	20,80	17,50
WSZ-A	0,34750	5,10	18,80	6,20
WSZ-B	0,36032	9,00	19,60	10,70
WS-A	0,40966	23,90	20,10	13,60
WS -B	0,45947	38,90	22,90	29,40

Fonte: Adaptado de Wdowiak-Postulak e Kawecki (2025).

Em termos de resultados, os maiores ganhos na rigidez das peças e na capacidade de carga última foram observados em vigas reforçadas com barras de aço convencionais. Porém,

o aço falhou devido a plastificação antes da madeira. As melhorias nas vigas reforçadas com barras de BFRP e GFRP, foram classificadas como intermediárias na rigidez e na carga última devido aos resultados obtidos terem sido menores. O comparativo do aumento da rigidez e da força de ruptura estão elencadas na [Tabela 26](#).

3.2.2.3.3 Avaliação do estudo de Raftery e Rodd (2015)

Raftery e Rodd (2015) investigaram a viabilidade técnica e econômica de reforçar vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT), fabricadas com madeira de baixa qualidade, utilizando placas de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) coladas com o adesivo tradicionalmente empregado na colagem de madeira, o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), em vez de adesivos epóxi, mais caros e com exigências específicas de aplicação. A pesquisa avaliou o desempenho mecânico dessas vigas em termos de rigidez, capacidade última à flexão, distribuição de deformações e modos de falha, além de desenvolver um modelo numérico não linear para comparação com os resultados experimentais.

O estudo utilizou madeira da espécie *Picea sitchensis* (abeto de Sitka), de origem irlandesa, classificada mecanicamente na classe C16. As vigas foram produzidas com cinco lamelas, apresentando 3610 mm de comprimento e 190 mm de altura, sendo parte delas reforçadas com placas GFRP de 4 mm de espessura, inseridas na zona tracionada acima de uma lamela de sacrifício com 25 mm de espessura. O programa experimental envolveu três fases: a Fase A (vigas sem reforço com 190 mm de altura), a Fase B (vigas sem reforço com 215 mm de altura devido à adição da lamela de sacrifício) e a Fase C (vigas reforçadas com GFRP e lamela de sacrifício). Foram testadas 21 vigas no total, sendo 6 na Fase A, 9 na Fase B e 5 na Fase C, conforme detalhado na Tabela 2 do artigo. Os ensaios foram realizados em flexão a quatro pontos, segundo a norma EN 408, e incluíram medições de rigidez global e local, além da instrumentação de uma viga com extensômetros para registrar o perfil de deformações.

A fabricação das vigas foi cuidadosamente planejada: as lamelas foram classificadas por módulo de elasticidade e inspecionadas visualmente, com as melhores classificadas posicionadas nas zonas mais solicitadas. A aplicação do adesivo PRF seguiu os procedimentos típicos da indústria madeireira, inclusive para a colagem do GFRP. A adição da lamela de sacrifício teve o propósito duplo de proteção ao fogo e prolongamento da vida útil do reforço. O comportamento mecânico das vigas reforçadas foi modelado numericamente por elementos finitos, considerando anisotropia da madeira, plasticidade em compressão e vínculo perfeito entre madeira e FRP.

O modelo numérico desenvolvido pelos autores foi implementado utilizando a linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL), e teve como objetivo simular o comportamento estrutural das vigas reforçadas e não reforçadas sob carregamento em flexão. Para otimização computacional, apenas metade da viga foi modelada, explorando a simetria do sistema. O modelo considerou elementos finitos de oito nós em regime de tensão plana e incluiu a representação das placas de aço nos apoios e nos pontos de aplicação de carga para evitar concentrações de tensões. A madeira foi modelada como um material ortotrópico com comportamento elástico-linear na tração e plástico-anisotrópico na compressão, com base no critério de escoamento de Hill, enquanto o FRP foi representado como material ortotrópico linear elástico.

A interface entre as lamelas de madeira e entre a madeira e o FRP foi considerada perfeitamente aderida, uma suposição validada pelos bons resultados dos testes de aderência com o adesivo PRF. As propriedades do material inseridas no modelo foram obtidas a partir de ensaios experimentais, dados de literatura e correlações com características como a razão de área de nós da madeira. O modelo utilizou uma análise estática incremental com pequenos deslocamentos, na qual os elementos eram progressivamente desativados ao atingirem tensões críticas, simulando a falha localizada. Comparações entre os resultados numéricos e os experimentais mostraram excelente concordância nos valores de rigidez, capacidade última e distribuição de deformações, com o modelo apresentando um comportamento ligeiramente conservador, cerca de 2% inferior para rigidez e 12% para momento fletor último. Isso evidenciou que o modelo é confiável para prever o comportamento de vigas de madeira de baixa qualidade reforçadas com FRP e coladas com adesivos convencionais.

Os resultados mostraram que a adição de 1,86% de reforço em área transversal proporcionou aumento médio de 18% na rigidez e 31% na capacidade última à flexão das vigas. As vigas reforçadas apresentaram comportamento pseudo-dúctil, com ruptura inicialmente na lamela de sacrifício, diferentemente das vigas não reforçadas, que falharam de forma frágil por tração. Além disso, não foi observada delaminação ou escorregamento na interface madeira-FRP, o que comprova a eficiência do adesivo PRF para essa aplicação. O modelo numérico previu com precisão o comportamento força *versus* deslocamento e os perfis de deformação, confirmando a validade da abordagem proposta e apontando a possibilidade de uso de adesivos tradicionais de madeira em soluções de reforço estrutural economicamente mais viáveis.

3.2.2.3.4 Avaliação do estudo de Donadon *et al.* (2020)

O objetivo do trabalho desenvolvido por Donadon *et al.* (2020) foi investigar experimental e numericamente o comportamento de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas com fibras sintéticas *Vectran* (FRP), com o intuito de avaliar a eficácia desse tipo de reforço na melhoria da rigidez, resistência e ductilidade das vigas. O estudo também buscou explorar o potencial das fibras de *Vectran*, pouco utilizadas na engenharia civil, como alternativa intermediária entre as fibras de carbono e de vidro em termos de desempenho mecânico e custo.

O programa experimental envolveu a produção de oito vigas de madeira lamelada colada com lamelas de *Pinus elliottii*, sendo três vigas não reforçadas (grupo de referência) e cinco vigas reforçadas com diferentes quantidades de tecido de *Vectran* embebido em resina epóxi. As dimensões das vigas foram de 3000 mm de comprimento e seção transversal de 180 mm de altura por 53 mm de largura. O reforço foi aplicado na face tracionada das vigas, com número de camadas variando entre duas e oito, resultando em diferentes espessuras e taxas de armadura. Ensaios de flexão em três pontos (Figura 51) foram realizados com monitoramento por LVDTs e extensômetros, permitindo determinar rigidez, tensões normais, deformações e cargas últimas.

Para a caracterização das propriedades dos materiais, foram utilizados métodos como a regra das misturas para o cálculo das propriedades mecânicas do reforço compósito, levando em consideração as frações volumétricas de fibras e adesivo. A preparação das vigas incluiu a aplicação cuidadosa do reforço com múltiplas camadas de tecido de *Vectran* e impregnação com epóxi estrutural, seguindo protocolos de cura e prensagem. O comportamento das vigas foi analisado em dois estágios de carregamento: até 50% da carga última (regime elástico) e da metade até a ruptura (regime não linear). A análise dos resultados revelou que o aumento da espessura do reforço nem sempre implicou em ganhos proporcionais de rigidez, indicando uma influência significativa do adesivo e da qualidade da impregnação.

A análise numérica foi conduzida no software ANSYS, utilizando elementos finitos tridimensionais para a madeira e elementos de casca para o reforço. As propriedades mecânicas da madeira e do compósito foram extraídas dos ensaios experimentais e aplicadas ao modelo. As interações entre a madeira e o reforço foram modeladas como perfeitamente aderidas. Foram realizadas análises estáticas com aplicação incremental de carga, simulando os ensaios de flexão em três pontos. A convergência da malha foi assegurada por meio do método GCI, resultando em uma discretização eficiente com elementos de 23 mm.

Figura 51 - Arranjo do teste de flexão das vigas de madeira lamelada colada.



Fonte: Donadon *et al.* (2020).

A simulação numérica permitiu avaliar os deslocamentos e tensões ao longo do carregamento, especialmente na região de compressão e na interface com o reforço. Os resultados numéricos mostraram boa concordância com os dados experimentais no regime elástico (até 50% da carga), com diferenças variando entre -7,3% e +29,9% na rigidez. Contudo, para o regime não linear (entre 90% da carga e a ruptura), as discrepâncias foram maiores, chegando até 309%, devido à complexidade da plastificação da madeira e à transição de comportamento elástico para plástico, o que evidencia limitações do modelo em simular o colapso estrutural com alta fidelidade.

Em termos de desempenho, as vigas reforçadas apresentaram ganhos de rigidez entre 19,5% e 34,9% e aumentos na carga última entre 7% e 40%, quando comparadas às vigas não reforçadas. Houve também uma mudança significativa no modo de falha: enquanto as vigas de referência falharam de forma frágil por tração, as vigas reforçadas apresentaram falha dúctil por plastificação em compressão, com formação de patamares de deformação. Além disso, a variabilidade nos resultados foi reduzida, indicando maior previsibilidade estrutural com o uso do reforço. Esses achados sugerem que as fibras de Vectran, embora pouco utilizadas, representam uma solução viável e eficiente para o reforço de estruturas de madeira de baixa resistência.

3.2.2.3.5 Avaliação do estudo de Raftery e Harte (2013)

Raftery e Harte (2013) criaram um modelo numérico não linear capaz de simular com precisão o comportamento mecânico de vigas de madeira lamelada colada de baixa qualidade reforçadas com placas de polímero reforçado com fibras (FRP). O modelo foi desenvolvido

com o intuito de prever o comportamento carga-deflexão, a rigidez à flexão, a capacidade última de momento fletor e a distribuição de deformações, considerando a anisotropia e a plasticidade do material madeira, especialmente em compressão. A validação foi realizada por meio da comparação com resultados experimentais de vigas reforçadas e não reforçadas.

O programa experimental utilizado para validar o modelo numérico envolveu quatro fases de ensaios com vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) fabricadas com madeira do Alaska *Sitka spruce* (Espruce de sitka - classificação C16). As fases incluíram: (A) vigas não reforçadas com 190 mm de altura; (B) vigas reforçadas com placas de FRP coladas na face inferior; (C) vigas não reforçadas com laminação sacrificial (altura de 215 mm); e (D) vigas reforçadas com FRP e laminação sacrificial (também 215 mm). As placas de FRP utilizadas foram formadas por duas lâminas de 1,2 mm unidas com adesivo epóxi, totalizando 2,8 mm de espessura. A adesão entre os materiais foi considerada perfeita no modelo devido à ausência de falhas nas interfaces durante os ensaios.

O modelo foi desenvolvido no software ANSYS, utilizando elementos de tensão plana de segunda ordem. Cada laminação da viga foi modelada individualmente para considerar variações nas propriedades da madeira. O comportamento da madeira foi definido por um modelo elástico-perfeitamente plástico para compressão e elástico frágil para tração, utilizando a teoria de plasticidade anisotrópica baseada em Hill, adaptada por Shih e Lee. O critério de falha adotado foi o de tensão máxima, com elementos sendo desativados quando a tensão de ruptura na madeira era atingida. O modelo também considerou placas de aço nas regiões de apoio e carregamento para evitar concentrações de tensões.

Os resultados obtidos demonstraram boa concordância entre os dados experimentais e os valores preditos pelo modelo numérico em termos de rigidez e capacidade última. As vigas reforçadas com FRP apresentaram aumento médio de 12,13% na rigidez e até 38% na capacidade última em relação às vigas não reforçadas. Já o modelo previu incrementos de 8,4% e 17%, respectivamente, demonstrando comportamento conservador, mas eficaz. As simulações também mostraram que melhorias na qualidade da madeira na zona tracionada (como a eliminação de nós) podem ampliar significativamente o desempenho estrutural.

3.2.2.3.6 Avaliação do estudo de He et al. (2022)

He et al. (2022) investigaram de forma experimental e analítica o desempenho à flexão de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) reforçadas internamente com lâminas de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP). O estudo visou compreender o impacto de

variáveis como a razão de reforço, o módulo de elasticidade (MOE) do CFRP e o arranjo das lâminas no comportamento estrutural das vigas, utilizando ensaios experimentais, modelagem numérica por elementos finitos (FEM), e análises teóricas com base no modelo de Bazan-Buchanan.

Foram ensaiadas 18 vigas de MLC/GLT de *Pseudotsuga menziesii* (abeto de Douglas) divididas em seis grupos: dois grupos de controle (sem reforço) e quatro grupos com reforço interno de CFRP variando o número de camadas e o MOE do material ($2,04 \times 10^5$ MPa ou $2,35 \times 10^5$ MPa). As seções transversais variaram entre 120 mm e 140 mm de largura, mantendo altura de 300 mm e comprimento de 3.000 mm. Os reforços de CFRP foram inseridos horizontalmente na região tracionada durante a fabricação das vigas. Os ensaios foram realizados com carregamento em quatro pontos, usando LVDTs e extensômetros.

As falhas observadas nas vigas sem reforço foram abruptas e causadas por defeitos naturais, como nós nas lamelas inferiores, resultando em fratura frágil. Já nas vigas reforçadas, as trincas surgiram com menor velocidade de propagação, e o modo de ruptura tornou-se mais dúctil, com maior aproveitamento das fibras na zona comprimida. Em alguns casos, observou-se rugosidade nas fibras da madeira na zona comprimida e até rompimento fora do plano das lâminas de CFRP. A introdução do reforço não alterou o modo de falha predominante (ruptura da lamela inferior), mas mitigou sua severidade.

Os resultados (Tabela 27) mostraram que o reforço com CFRP aumentou a capacidade de carga das vigas entre 4,48% e 8,82%, e a deflexão máxima entre 9,24% e 18,32%, dependendo da configuração de reforço. A rigidez aparente (E_{appI}) teve incremento limitado, inferior a 3% para a maioria dos grupos. A modelagem numérica obteve boa concordância com os ensaios experimentais (diferenças inferiores a 11% para momento fletor e 16% para rigidez). A análise teórica também se mostrou eficiente, com erro inferior a 10%, validando o uso de modelos analíticos baseados na transformação de seções e na lei de Bazan–Buchanan.

Tabela 30 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos.

Grupo de vigas	Mu (Exp.) ¹ (kN.m)	Mu (Te) ² (kN.m)	Diferença (%)	Rigidez Flexão (Exp.) (kN.m ²)	Rigidez Flexão (Teórico) (kN.m ²)	Diferença (%)
WH	135,11	141,94	+5,05%	4,958	5,109	+3,04%
NH	108,42	115,46	+6,49%	4,212	4,149	+1,52%
WL	132,54	141,66	+6,88%	5,506	5,103	+7,31%
WH+H	138,04	149,37	+8,21%	5,281	5,136	+2,75%

Fonte: Adaptado de He *et al.* (2022).

Nota: ¹ Momento último experimental; ² Momento último teórico.

3.2.2.3.7 Avaliação do estudo de Corradi et al. (2018)

Corradi *et al.* (2018) avaliaram o comportamento à flexão de vigas de madeira dura de Carvalho vermelho (*Quercus robur*) e macia de Abeto branco (*Abies alba*) reforçadas com placas de GFRP (polímero reforçado com fibra de vidro) mecanicamente conectadas por parafusos de aço, sem o uso de adesivos. A proposta busca oferecer uma técnica de reforço estrutural reversível e compatível com critérios de conservação de patrimônio histórico, mantendo a integridade da madeira e possibilitando aumento significativo da capacidade de carga e rigidez das vigas.

O programa experimental envolveu um total de 91 vigas de madeira, sendo 50 de madeira dura (*hardwood*) e 41 de madeira macia (*softwood*), com diferentes dimensões. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão em quatro pontos conforme a norma EN 408, utilizando diferentes configurações de reforço com placas GFRP fixadas com parafusos de alta resistência (M8 e 16 mm de diâmetro). As configurações variaram de acordo com o número, a posição das placas (inferior ou lateral) e a quantidade de conectores mecânicos. As vigas de madeira dura apresentaram seção de 65×65 mm ou 145×145 mm, enquanto as de madeira macia possuíam seções de 95×95 mm ou 200×200 mm, e os comprimentos variaram de 1300 mm a 4000 mm.

As placas de GFRP utilizadas foram do tipo pultrudado, com espessuras de aproximadamente 8,4 mm e 9,5 mm, compostas por fibras E-glass e matriz de poliéster. As vigas foram classificadas como D30 (*hardwood*) e C18 (*softwood*), sendo que as propriedades mecânicas da madeira foram determinadas por ensaios de tração, compressão e flexão. Durante os ensaios, foram observados os modos de falha, as curvas carga-deflexão e os incrementos de rigidez e resistência proporcionados pelas diferentes configurações de reforço. Todas as vigas foram carregadas até a ruptura total, e em nenhuma delas houve falha por defeito no furo dos parafusos ou por deformação dos conectores.

Os resultados demonstraram incrementos expressivos na capacidade de carga das vigas reforçadas. Para as vigas de madeira dura, os aumentos de resistência à flexão chegaram até 75% (configuração REK) e os de rigidez até 49,7%, evidenciando que o reforço é mais eficaz neste tipo de madeira. Já nas vigas de madeira macia, os ganhos máximos foram de 33% em resistência e 21,3% em rigidez, limitados principalmente pelo menor desempenho da conexão por embutimento e deslizamento entre madeira e GFRP. A falha das vigas ocorreu predominantemente por ruptura na madeira na região tracionada, e não por falha nas placas ou nos conectores metálicos. A técnica de reforço com placas GFRP mecanicamente conectadas

mostrou-se eficiente, segura e compatível com critérios de reversibilidade em edificações históricas.

3.2.2.3.8 Conclusões das investigações dos trabalhos experimentais e numéricos

Os estudos analisados evidenciam um avanço técnico significativo na aplicação de simulações numéricas combinadas com investigações experimentais para a análise do comportamento estrutural de elementos de madeira reforçados. A integração de métodos computacionais com validações empíricas tem se mostrado eficaz na reprodução do desempenho físico de vigas de madeira em condições ambientais e, em alguns casos, sob efeitos térmicos.

Apesar dos avanços observados, constata-se que a maioria dos estudos prioriza o uso de materiais compósitos, como os polímeros reforçados com fibras (FRP), sobretudo CFRP e GFRP. A investigação da madeira em situação de incêndio com reforços metálicos, especialmente barras de aço passivas, permanece incipiente na literatura. A maior parte dos trabalhos aborda reforços superficiais ou externos, com pouca ênfase na análise do comportamento térmico-estrutural sob fogo. Dessa forma, percebe-se uma lacuna científica relevante, que destaca a importância e a originalidade do presente estudo, voltado à análise numérica do comportamento de vigas de madeira de *Pinus* reforçadas internamente com armaduras de aço em cenários de incêndio, justificando os resultados ainda parciais quanto ao enfoque a ser aqui analisado.

3.2.2.4 Análise dos artigos, dissertações e teses sobre taxas de carbonização

3.2.2.4.1 Avaliação do estudo de Schaffer (1967)

Schaffer (1967) determinou a taxa de carbonização de três espécies de madeira, *Pseudotsuga menziesii* (Abeto de douglas), *Pinus echinata* (Pinheiro do sul) e *Quercus alba* (Carvalho branco) em exposição ao fogo perpendicular às fibras, avaliando o efeito da densidade, umidade, orientação dos anéis de crescimento e composição estrutural. A taxa de carbonização é apresentada como um parâmetro crítico para avaliar a resistência residual de elementos estruturais de madeira expostos ao fogo.

O estudo teve como objetivo principal determinar experimentalmente a taxa de carbonização de espécies de madeira utilizadas na construção civil e, com isso, fornecer dados

que contribuíssem para o projeto de estruturas mais seguras e para o desenvolvimento de normas técnicas. O método experimental consistiu em submeter corpos de prova a um regime de aquecimento padronizado por 60 minutos considerando o padrão de queima ASTM E-119-1. As medições da profundidade da camada carbonizada foram realizadas com precisão, permitindo o cálculo da taxa de carbonização linear (mm/min).

As taxas médias de carbonização observadas foram de 1,39 a 1,62 polegadas por hora (35,3 a 41,1 mm/h), com o *Quercus alba* (Carvalho branco) apresentando variações conforme a orientação dos anéis: 1,62 in/h paralelamente, 1,50 in/h a 45° e 1,39 in/h perpendicularmente. O estudo revelou que a densidade é o principal fator que afeta a taxa de carbonização, sendo que madeiras menos densas carbonizam mais rapidamente. A umidade também teve impacto, com valores acima de 50% retardando significativamente a degradação térmica.

A análise dos dados indicou que a taxa de carbonização não é constante ao longo do tempo, podendo ser maior nos primeiros minutos de exposição ao fogo. Verificou-se que outros fatores, como a permeabilidade ao longo do veio, conteúdo volátil e estrutura anatômica, influenciam a propagação da carbonização, embora de maneira secundária. Camadas mais densas com menor porosidade apresentaram menor taxa de carbonização. O trabalho apontou que a resistência ao fogo de madeiras pesadas como o *Quercus alba* é superior às mais leves, e que variáveis anatômicas e ambientais devem ser cuidadosamente controladas ao dimensionar elementos estruturais sujeitos ao fogo.

3.2.2.4.2 Avaliação do estudo de Babrauskas (2005)

Babrauskas (2005) teve como objetivo principal em seu estudo analisar se a taxa de carbonização da madeira poderia ser usada como ferramenta confiável em investigações de incêndio, especialmente na identificação da origem e intensidade do fogo. Foram revisados dados de ensaios padrão (ASTM E119 e ISO 834), testes em escala reduzida e queimas em escala real de ambientes construídos com madeira.

A taxa de carbonização da madeira é um dos parâmetros fundamentais na avaliação do desempenho de elementos estruturais submetidos a situações de incêndio. São apresentados dados experimentais consistentes sobre a velocidade de carbonização de diferentes madeiras sob condições padronizadas de ensaio, além de exposições a fluxos de calor constantes e incêndios em escala real. Esses dados reforçam a importância da correta definição desse parâmetro em modelos numéricos que buscam simular a degradação térmica da madeira. A adoção de taxas de carbonização validadas experimentalmente contribui para a fidedignidade

dos resultados obtidos, permitindo a comparação entre o comportamento esperado da estrutura e os limites definidos em norma para segurança ao fogo.

Diversas espécies foram analisadas (Tabela 28), como *Pseudotsuga menziesii* (abeto de Douglas), *Quercus alba* (Carvalho branco), *Pinus echinata* (Pinheiro do sul), *Abies sp.* (Abeto branco) e *Cryptomeria japonica* (Cedro japonês), com densidades variando entre 400 e 700 kg/m³. A taxa de carbonização para madeiras com densidade entre 400 e 550 kg/m³ variou entre 0,5 e 0,8 mm/min em condições de ensaio padrão. Os resultados indicam que, em estruturas sólidas sem emendas coladas, a taxa de carbonização é estável e compatível com os valores normatizados.

Tabela 31 - Levantamento de densidades e taxas de carbonização de diferentes espécies de madeira.

Espécie de Madeira	Densidade (kg/m ³)	Taxa de Carbonização (mm/min)	Fonte/Teste
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	450 - 565	0,67 - 0,68	ISO 834 / ASTM E119
<i>Abies sp.</i>	410	0,67	ISO 834
<i>Cryptomeria japonica</i>	420	0,74	ISO 834
<i>Pinus echinata</i>	510	0,65 - 0,77	ASTM E119 (estimado)
<i>Quercus alba</i>	650	0,4	Vários testes históricos
<i>Picea sitchensis</i>	450	0,7	ISO 834
<i>Tropical hardwoods</i>	até 1060	≤ 0,5	ISO 834

Fonte: Adaptado de Babrauskas (2005).

Outro aspecto abordado diz respeito à influência das descontinuidades físicas, como juntas não coladas, fissuras e frestas, na aceleração do processo de carbonização. O autor demonstra que essas imperfeições facilitam a penetração do calor e aumentam a taxa de carbonização em pisos, painéis e outros elementos delgados. Esse efeito é particularmente relevante para elementos compostos, como vigas de madeira reforçadas com barras de aço, pois essas zonas de contato entre materiais distintos podem configurar regiões de acúmulo de calor ou de propagação preferencial da frente de carbonização. A consideração dessas características geométricas na modelagem computacional é essencial para refletir com maior precisão o comportamento real da estrutura exposta ao fogo.

O trabalho evidenciou que a profundidade da carbonização pode refletir características como ventilação e tempo de exposição ao calor, mas não serve como indicativo exclusivo da origem do fogo ou da presença de combustíveis líquidos. O autor finaliza indicando que a taxa de carbonização é uma variável útil para estimativas forenses e estruturais, desde que usada em

conjunto com outros indicadores, respeitando as limitações de interpretação de padrões superficiais e de fissuras.

Essa compreensão contribui para reforçar a necessidade de considerar as características geométricas e construtivas das vigas deste trabalho proposto, incluindo a forma de interface entre a madeira e as barras de aço, a fim de obter uma análise realista do comportamento da estrutura durante a exposição ao fogo.

3.2.2.4.3 Avaliação do estudo de Nguyen et al. (2023)

Nguyen et al. (2023) investigaram métodos de medição de temperatura em madeira exposta ao fogo, com foco na eficácia dos termopares tipo K. Foram realizados testes em fornos conforme a norma ISO 834, utilizando termopares colocados em diversas posições (expostas e não expostas ao fogo), orientações (radial, tangencial e longitudinal) e profundidades.

Foram realizados ensaios em fornos construídos para simular a curva de incêndio padrão ISO-834. Amostras de madeira maciça e madeira-liga com aço foram instrumentadas com termopares tipo K de 1,5 mm. Três testes principais e outros 10 complementares foram conduzidos, variando o número de faces expostas ao fogo, a orientação dos termopares e a espécie de madeira utilizada.

Os resultados (Tabela 29) mostraram que a posição e orientação do termopar influenciam fortemente na precisão da medição. Termopares colocados no lado exposto tendem a superestimar as temperaturas internas devido à condução térmica direta. A melhor configuração observada foi o alinhamento paralelo às isothermas, reduzindo erros significativos. Foi observado que termopares de menor diâmetro apresentam maior coeficiente de convecção, mas podem ser mais suscetíveis a erros por oxidação em altas temperaturas ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$). A taxa de carbonização variou de 0,55 a 0,97 mm/min conforme a orientação do termopar, densidade da madeira e número de faces expostas.

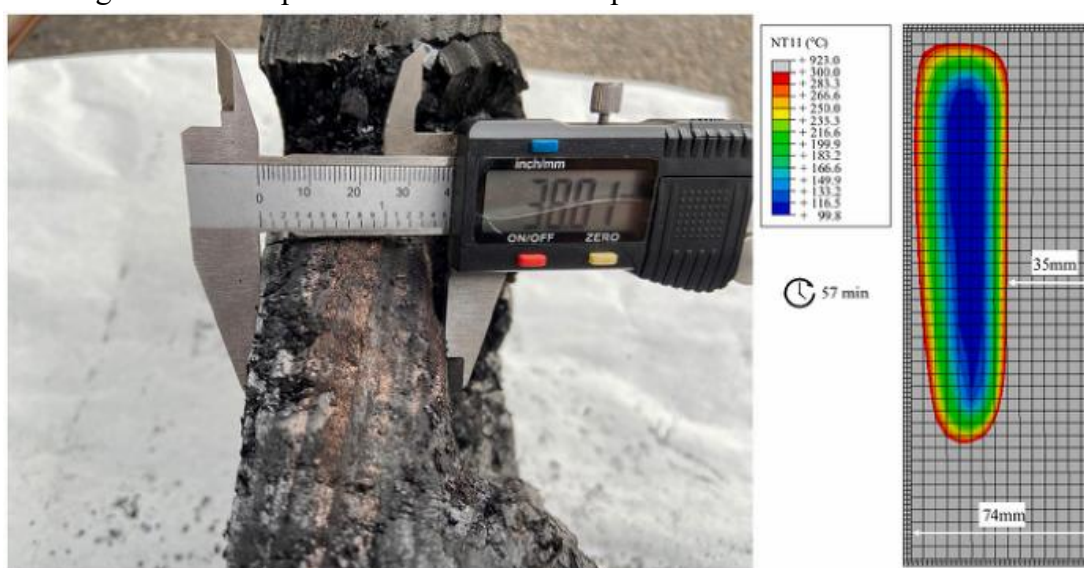
Posteriormente, foi executado um modelo térmico 2D, validado com base em ensaios experimentais anteriores. O modelo permitiu avaliar o comportamento térmico da madeira, incluindo a evolução da isoterma de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, usada como referência para estimar a profundidade da carbonização. Os resultados numéricos foram consistentes com os dados experimentais, especialmente com sensores dispostos paralelos às isothermas, mostrando a confiabilidade no modelo numérico quando em conformidade com os dados experimentais (Figura 52).

Tabela 32 - Profundidade de carbonização e taxas de carbonização

Teste n°	Dimensões (b × h) (mm)	Madeira remanescente (mm)	Camada carbonizada (isoterma 300 °C) (mm)	Taxa de carbonização pela camada carbonizada (mm/min)	Taxa de carbonização por termopar (radial não exposto) (mm/min)	Taxa de carbonização por termopar (superfície exposta) (mm/min)
1	74 × 220	36,68	37,32	0,635	0,568	0,854
2	74 × 220	38,71	35,29	0,588	0,604	0,955
3	74 × 220	36,72	37,28	0,621	0,605	0,952

Fonte: Adaptado de Nguyen *et al.* (2023).

Figura 52 - Comparativo entre o ensaio experimental e o modelo numérico.



Fonte: Nguyen *et al.* (2023).

A orientação dos termopares influencia significativamente a medição de temperatura. Termopares perpendiculares às isotermas ou mal instalados geram erros significativos. Também se observou que o contato térmico e o espaçamento no furo de instalação afetam os resultados. A presença de aço aumenta a condução de calor, elevando localmente a temperatura na madeira.

Concluiu-se que os termopares instalados pelo lado não exposto e paralelos às isotermas são mais precisos para medir temperaturas internas e estimar a taxa de carbonização. Termopares no lado exposto superestimam as temperaturas e devem ser evitados ou protegidos. A simulação numérica demonstrou ser uma ferramenta eficaz para complementar e validar os resultados experimentais.

3.2.2.4.4 Avaliação do estudo de Yang et al. (2009)

O estudo de YANG *et al.* (2009) teve por finalidade investigar a profundidade e a taxa de carbonização de madeiras lameladas coladas (MLC/GLT) de cinco espécies: *Taiwania cryptomerioides* (árvore café), *Cryptomeria japonica* (Sugi), *Cunninghamia lanceolata* (abeto da China), *Pseudotsuga menziesii* (abeto de Douglas) e *Southern pine* (pinheiro do sul), utilizando o ensaio padrão CNS12514 e calorimetria com cone. As taxas médias de carbonização variaram entre as espécies, com *Taiwania cryptomerioides* (árvore café) apresentando os maiores valores: até 0,897 mm/min no fundo e 0,750 mm/min nas laterais após 30 minutos. O *Southern pine* (pinheiro do sul) apresentou os menores valores: cerca de 0,604 mm/min lateralmente e 0,709 mm/min na base (Tabela 27).

Tabela 33 - Densidade e taxa de carbonização do *Southern pine*.

Grupo de amostras	Densidade (kg/m ³)	Tempo de exposição (min)	Face lateral Profundidade (mm)	Face lateral Taxa (mm/min)	Face inferior Profundidade (mm)	Face Inferior Taxa (mm/min)
6F ¹	524	30	17,0	0,568	17,2	0,574
6F	535	45	23,8	0,530	26,2	0,583
8F ²	538	60	32,8	0,547	34,0	0,566

Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2009).

Nota: ¹ Seção transversal de 266 × 140 mm; ² seção transversal de 266 × 190 mm.

As taxas de carbonização dos corpos de prova foram comparadas com os limites da Eurocode 5 (0,70 mm/min) e da norma australiana 1720.4. A maioria dos resultados ficou dentro dos limites, exceto por alguns valores mais altos para *Taiwania cryptomerioides* (árvore café) e *Cryptomeria japonica* (Sugi). A equação da norma australiana também foi discutida e os dados experimentais comparados graficamente. As análises com os modelos matemáticos mostraram que a taxa de carbonização inicialmente é elevada e tende a se estabilizar com o tempo. Foram obtidos coeficientes que permitiram prever a profundidade da carbonização com base no tempo de exposição ao fogo, sendo apresentados para cada espécie e face da amostra.

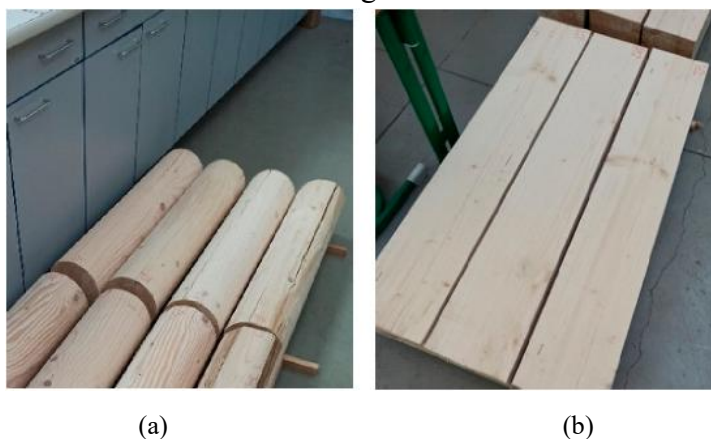
Verificou-se que a densidade influencia diretamente a taxa de carbonização, quanto maior a densidade, menor a taxa. A correlação entre densidade e taxa foi moderada ($r = 0,53$), mas aumentou quando a taxa foi ajustada pela densidade ($r \cong 0,89$). O estudo concluiu que a taxa de carbonização é maior na face inferior das amostras e diminui com o aumento da densidade da madeira. A ordem de severidade segue a densidade inversa dos materiais testados. Os modelos aplicados mostraram boa correlação para prever o comportamento térmico e os

dados do calorímetro de cone confirmaram a maior vulnerabilidade da *Taiwania cryptomerioides* (árvore café). Esses resultados contribuem para a previsão do desempenho ao fogo de elementos de madeira lamelada colada em projetos estruturais.

3.2.2.4.5 Avaliação do estudo de Špilák et al. (2022)

Špilák et al. (2022) propôs um modelo de análise térmica por elementos finitos com base no método de entalpia para estimar a espessura da camada carbonizada em vigas de madeira expostas ao fogo. A espécie testada foi o *Picea abies* (espruce da noruega), com seções circulares e retangulares (Figura 53). O modelo foi validado com testes de laboratório em escala média, nos quais a profundidade da camada carbonizada foi medida e comparada às previsões numéricas.

Figura 53 - Corpos de prova submetidos ao teste de fogo: (a) seção cilíndrica; (b) seção retangular.



Fonte: Špilák et al. (2022).

Os avanços propostos reforçam o papel da modelagem térmica detalhada como ferramenta essencial para prever o desempenho da madeira em situação de incêndio, sobretudo quando associada a estratégias de segurança contra o colapso estrutural. A confiabilidade demonstrada pelo modelo de entalpia indica que este método pode ser uma alternativa mais precisa às abordagens tradicionais baseadas em regressões empíricas ou coeficientes médios de carbonização.

Os corpos de prova foram submetidos à ação de um painel radiativo durante 60 minutos, com registro contínuo de temperaturas internas por meio de termopares. Após o resfriamento, foi feita a mensuração da área carbonizada por meio de corte transversal e análise em software

CAD. Esses dados experimentais serviram como base de comparação para os resultados simulados.

A modelagem considerou os efeitos térmicos de forma precisa, especialmente na faixa de 100 °C, onde a mudança de fase da água pode causar erros em modelos simplificados. A abordagem por entalpia mostrou-se mais robusta do que modelos baseados apenas em capacidade térmica.

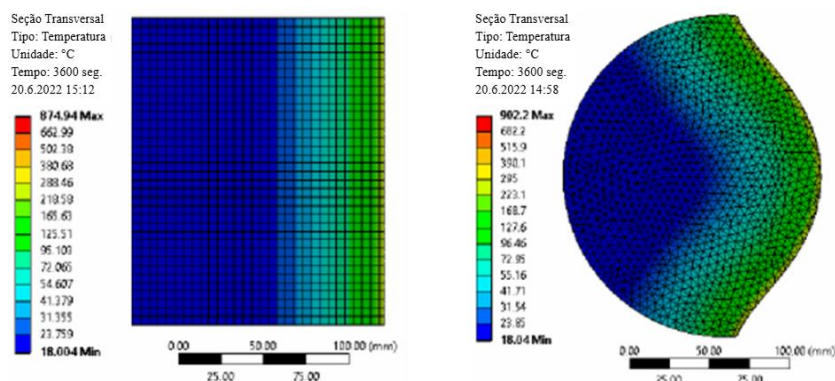
Figura 54 - Comparativo entre ensaios experimentais e numéricos: (a) corpos de prova retangulares pós-incêndio; (b) corpos de prova cilíndricos pós-incêndio; (c) resultados das simulações numéricas para os corpos de prova retangulares e cilíndricos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Adaptado de Špilák *et al.* (2022).

Os resultados mostraram boa concordância entre os dados numéricos e experimentais, com uma precisão média superior a 91% na previsão dos perfis de temperatura e da

profundidade da camada carbonizada (Figura 54). O modelo foi particularmente eficaz na reprodução do patamar térmico próximo aos 100 °C e nas regiões limítrofes à zona de pirólise. Além disso, a utilização da abordagem por entalpia permitiu a delimitação clara da fronteira entre madeira carbonizada e madeira íntegra, com base na isoterma de 300 °C, critério adotado por normas como a EN 1995-1-2.

Os resultados mostraram boa concordância entre os dados numéricos e experimentais, com uma precisão média superior a 91% na previsão dos perfis de temperatura e da profundidade da camada carbonizada (Figura 54). O modelo foi particularmente eficaz na reprodução do patamar térmico próximo aos 100 °C e nas regiões limítrofes à zona de pirólise. Além disso, a utilização da abordagem por entalpia permitiu a delimitação clara da fronteira entre madeira carbonizada e madeira íntegra, com base na isoterma de 300 °C, critério adotado por normas como a EN 1995-1-2.

Embora o trabalho não tenha apresentado taxas de carbonização explícitas em mm/min, este contribui de forma relevante para o estado da arte no que concerne a modelagem térmica de elementos de madeira expostos ao fogo. A aplicação da análise por entalpia se mostra promissora não apenas por sua precisão, mas também pela possibilidade de uso em geometrias complexas e diferentes condições de exposição.

3.2.2.4.6 Avaliação do estudo de Pečenko, Svensson e Hozjan (2015)

Pečenko, Svensson e Hozjan (2015) apresentam em seu estudo um modelo numérico que simula o acoplamento entre transferência de calor, transporte de umidade e formação de camada carbonizada em elementos de madeira expostos ao fogo. O modelo se baseia em um sistema de equações diferenciais parciais não lineares, resolvido pelo método dos elementos finitos, com o objetivo de representar com precisão o processo transiente de degradação térmica da madeira.

O modelo adota como variáveis principais a temperatura (T), a concentração de água ligada, a concentração de vapor de água e a pressão do gás. A transferência de calor é governada por uma equação de conservação da entalpia, que leva em conta a condução, a convecção associada ao transporte de massa e os efeitos de mudança de fase (evaporação/condensação). A Equação 20 representa a conservação da entalpia.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - q_{cv} \cdot \nabla T - \Delta H_s \cdot c \quad (20)$$

Onde qC representa a capacidade térmica efetiva do meio poroso, q_{cv} é o fluxo de calor convectivo e ΔH_S é o calor de sorção associado à transição entre a água ligada e o vapor. No que tange ao transporte de umidade, são consideradas três fases, sendo a água ligada, vapor de água e ar. A difusão da água ligada é modelada considerando o efeito de Soret, representada pela [Equação 21](#).

$$J_b = -D_b \cdot \nabla c_b - D_{bT} \cdot \nabla T \quad (21)$$

Os coeficientes de difusão D_b e D_{bT} dependem da temperatura e da concentração de umidade, manifestados pelas relações:

$$D_b = D_0 \exp\left(\frac{E_b}{RT}\right) \quad (22)$$

$$D_{bT} = \frac{D_b E_b}{c_b R T^2} \quad (23)$$

Além disso, a modelagem do processo de sorção é feita por meio de uma equação de taxa que incorpora a histerese entre adsorção e dessorção, com uma formulação ajustada para temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água. A troca de umidade entre a água ligada e o vapor é descrita pela [Equação 24](#):

$$c = \begin{cases} H_c(c_{bl} - c_b), & T \leq T_{boil} \\ H_c(0 - c_b), & T > T_{boil} \end{cases} \quad (24)$$

A profundidade da carbonização é determinada com base na temperatura de 300 °C como critério limite. Acima desse valor, assume-se que a madeira já se encontra carbonizada, e apenas a condução térmica é considerada na camada de carvão. A propagação da frente de carbonização é incorporada ao modelo como uma fronteira móvel.

A validação do modelo foi feita comparando-se os resultados numéricos com dados experimentais de König e Walleij (1999), Lache (1992) e Yang et al. (2009), para diferentes teores de umidade inicial (12% e 20%). As temperaturas simuladas apresentaram excelente concordância com os dados experimentais, especialmente nos primeiros 30 mm de profundidade. Além disso, o modelo previu com precisão o perfil de umidade, a concentração de vapor e a pressão interna ao longo do tempo.

A [Tabela 31](#) apresenta a comparação entre os valores experimentais e simulados de profundidade da camada carbonizada para diferentes durações de exposição ao fogo padronizado (curva ISO 834), destacando a boa concordância dos resultados.

Tabela 34 - Comparação entre profundidades de carbonização (mm).

Tempo (min)	Experimental		Simulação	
	Lateral	Base	Lateral	Base
30	18,8 (2,7)	20,8 (2,0)	18,8	19,2
45	26,4 (2,8)	30,3 (2,4)	27,2	28,2
60	37,4 (4,2)	37,9 (1,6)	35,3	38,4

Fonte: Adaptado de Pečenko, Svensson e Hozjan (2015).

O modelo proposto representa um avanço significativo na análise do desempenho ao fogo de elementos de madeira. Sua capacidade de capturar com precisão os efeitos térmicos e higroscópicos, incluindo a transição de fases e a formação da camada carbonizada, o torna uma ferramenta promissora para o dimensionamento baseado em desempenho.

3.2.2.4.7 Avaliação do estudo de Damasceno Silva (2022)

Damasceno Silva (2022) avaliou a influência de diferentes modelos de carbonização na análise não linear geométrica de treliças de madeira em situação de incêndio, por meio de simulações numéricas com o método dos elementos finitos. Considerou-se a redução da seção transversal dos elementos estruturais em função da espessura da camada carbonizada.

Foram consideradas sete espécies de madeira, sendo cinco folhosas e duas coníferas, e os modelos de carbonização utilizados foram baseados na proposta de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190, na norma europeia EN 1995-1-2 (Eurocode 5) e na norma australiana AS 1720.4. Os valores das taxas de carbonização variaram de acordo com a espécie e com as análises experimentais e normativas levantadas, conforme [Tabela 32](#).

Os resultados demonstraram que a análise não linear fornece estimativas mais precisas de tensões, esforços e deslocamentos, essencial para avaliar instabilidades estruturais. Foi observada variação nos resultados conforme a norma aplicada, destacando-se a maior segurança associada à consideração do aquecimento lento da madeira prevista na norma europeia. O estudo também propôs um novo procedimento computacional para estimar forças críticas com menor custo computacional, mostrando-se eficaz e promissor para futuras aplicações.

Tabela 35 - Espécies de madeira e propriedades inerentes.

Espécie	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_0 (MPa)	β_n (mm/min)		
					Experimental	Eurocode 5	AS 1720.4
<i>Corymbia citriodora</i> ¹	999	62,0	123,6	18421	0,58	0,55	0,48
<i>Eucalyptus grandis</i> ¹	640	40,3	70,2	12813	0,58	0,55	0,59
<i>Lyptus</i> ²	743	60,7	51,2	7816	0,69	0,55	0,54
<i>Pinus</i> ²	505	32,1	27,5	5815	0,95	0,80	0,71
<i>Douglas-fir</i> ³	480	49,9	107,6	13400	0,59	0,80	0,74
<i>Southern pine</i> ³	590	58,4	100,0	13700	0,74	0,80	0,63
<i>White oak</i> ³	680	51,3	105,0	12300	0,52	0,55	0,57

Fonte: Damasceno Silva (2022).

Nota: ¹ Pinto (2005); ² Martins (2016); ³ Forest Products Laboratory (2010).

O estudo concluiu que a análise não linear geométrica é essencial para estimativas mais precisas de esforços, tensões e deslocamentos em treliças de madeira, especialmente em situação de incêndio, além de permitir a avaliação da instabilidade estrutural. Observou-se que os modelos de taxa de carbonização adotados pelas normas influenciam significativamente os resultados, sendo que a norma europeia (EN 1995-1-2) apresentou desempenho mais favorável por considerar o aquecimento lento da madeira, aspecto que merece maior investigação e poderia ser incorporado em futuras revisões da NBR 7190. Também se destacou a vantagem de adotar modelos de carbonização baseados na densidade da madeira, como o da norma australiana, em vez de valores fixos. O método da força crítica aparente proposto mostrou-se eficiente, reduzindo substancialmente o tempo e o custo computacional da análise de instabilidade, sendo uma alternativa promissora para aplicações futura.

3.2.2.4.8 Avaliação do estudo de Antunes Martins (2016)

Antunes Martins (2016) teve como foco a análise térmica e mecânica de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) sob condições de incêndio, com ênfase no estudo experimental e numérico da carbonização. O trabalho considerou elementos produzidos com madeiras de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*, incluindo versões tratadas com retardantes de chamas.

A taxa de carbonização foi determinada com base em ensaios em forno horizontal, seguindo a curva ISO 834. Os valores obtidos para madeira sem tratamento foram 0,69mm/min para a madeira híbrida “*Lyptus*” (*Eucalyptus grandis* var. *urophilla*) e 0,95 mm/min para *Pinus spp.*

A autora demonstrou que a densidade da madeira exerce papel importante na taxa de carbonização, sendo que o *Eucalyptus ssp.*, por ser mais denso, apresentou melhor resistência térmica. Os tratamentos retardantes também mostraram boa eficácia em reduzir a velocidade de avanço da camada carbonizada, além de contribuir para a integridade da estrutura durante a exposição.

Os resultados foram analisados por meio de simulações computacionais, validando os dados experimentais. As análises consideraram também a deflexão das vigas e a distribuição térmica interna, que foram compatíveis com os modelos teóricos utilizados.

3.2.2.4.9 Conclusões da seção: Taxas de carbonização

O entendimento das taxas de carbonização é essencial para a avaliação precisa do desempenho estrutural de elementos de madeira expostos ao fogo. A quantificação da perda de material devido à ação térmica permite estimar a seção resistente remanescente ao longo do tempo, sendo um parâmetro crítico nos projetos de segurança contra incêndio. A análise comparativa entre diferentes normas técnicas evidencia disparidades nos valores adotados e reforça a importância da adequação dos modelos de cálculo à espécie de madeira utilizada e às condições específicas de exposição.

Adicionalmente, a utilização de dados experimentais e simulações numéricas contribui significativamente para a calibração e validação de modelos preditivos mais realistas. A integração dessas informações ao processo de dimensionamento fortalece a confiabilidade das estruturas em madeira, especialmente quando combinadas com reforços metálicos, como no caso em estudo. Dessa forma, esses estudos oferecem um aporte teórico e técnico relevante para a consolidação de critérios de projeto mais seguros e embasados cientificamente.

3.3 CONCLUSÃO GERAL DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A revisão de literatura realizada no Capítulo 3 permitiu um mapeamento abrangente do estado da arte em relação ao uso estrutural da madeira, seu comportamento em situação de incêndio e as diferentes técnicas de reforço utilizadas em vigas e elementos estruturais. Os estudos analisados contemplam uma variedade de metodologias experimentais e numéricas aplicadas principalmente em condições ambiente, destacando-se a aplicação de materiais compósitos, como CFRP e GFRP, no aumento da rigidez e da resistência de vigas de madeira.

Entretanto, ao se restringir o escopo para cenários de incêndio, observa-se uma escassez crítica de estudos que investiguem o comportamento da madeira reforçada com barras de aço passiva. A maioria das pesquisas disponíveis foca em reforços com polímeros ou fibras sintéticas, cuja performance em altas temperaturas é limitada ou degradável. São raros os trabalhos que empregam o aço como elemento de reforço embutido e avaliam seu desempenho em situações de fogo, o que torna o tema proposto nesta dissertação extremamente relevante.

Outro aspecto importante verificado foi a limitação de ensaios térmicos e a dificuldade de reprodução experimental de incêndios em escala real, o que reforça o uso da modelagem numérica como ferramenta viável para simulações complexas. Os modelos analisados apontam tendências claras no aumento da capacidade de carga e na alteração dos modos de ruptura em elementos reforçados, mas poucos avaliam os efeitos da degradação térmica simultaneamente. Essa ausência de correlação entre efeitos térmicos e estruturais nas análises torna evidente a carência de estudos integrativos.

A maioria dos artigos encontrados apresenta reforços com FRP em condição ambiente, deixando de lado a avaliação dos reforços metálicos e a aplicação combinada de modelagem térmica, estrutural e de carbonização. Esse hiato científico indica uma zona de incerteza de conhecimento clara e potencial inexplorado, especialmente considerando a viabilidade econômica e a estabilidade térmica do aço frente ao fogo, em comparação aos materiais compósitos.

Portanto, o presente trabalho se destaca ao propor uma abordagem numérica inédita, focada na simulação de vigas de madeira de *Pinus* reforçadas com barras de aço embutidas, expostas a cenários de incêndio. Ao preencher campo inexplorado, a pesquisa oferece uma importante contribuição à engenharia de segurança contra fogo, à modelagem de estruturas híbridas madeira-aço e ao desenvolvimento de diretrizes para projetos mais seguros e eficientes.

Embora a literatura seja ampla no que diz respeito ao reforço de madeira com materiais alternativos em condições ambientais, há uma quase inexistência de investigações que integrem reforços metálicos com a análise do comportamento da madeira em incêndio.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos objetivos principais deste trabalho foi determinar o comportamento termomecânico de vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT), para aplicação de um modelo capaz de representar a realidade com dados fidedignos, fez-se necessário validar a metodologia numérica em duas etapas:

1ª etapa - Inicialmente, em condições de temperatura ambiente, tomando como referência o estudo experimental de Soriano, Pellis e Mascia (2016) sobre vigas de madeira lamelada colada (MLC/GLT) submetidas à flexão em quatro pontos, e;

2ª etapa - Posteriormente, em altas temperaturas (incêndio padrão da norma ISO-834), considerando os resultados experimentais obtidos por Matsushita e Shioya (2023b).

Nas análises não lineares, as propriedades constitutivas dos materiais (madeira e aço) foram obtidas a partir de estudos Soriani, Pellis e Mascia (2016) e Moya e Baño (2017), resultados já consolidados na literatura, que caracterizam o comportamento mecânico e térmico desses materiais. Para a madeira, foi adotado o critério de plastificação de Hill, adequado a materiais ortotrópicos e para o aço utilizou-se o critério de Von Mises, empregado para materiais isotrópicos submetidos a estados de tensão multiaxiais.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Propriedades da madeira e critério de comportamento mecânico

Para a análise numérica, foram consideradas duas larguras (b) de seção transversal (0,10 m e 0,20 m), associadas a quatro diferentes alturas (h), correspondentes a 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 vezes a largura. Dessa forma, serão avaliadas uma variabilidade significativa de seções e a influência desses parâmetros.

As análises contemplaram três comprimentos (l) de viga (3 m, 4 m e 5 m) e todas as combinações possíveis entre os comprimentos e seções transversais, totalizando 24 configurações geométricas distintas. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho estrutural e termomecânico de vigas de MLC/GLT com diferentes inércias e dimensões seccionais sob condições de carga e exposição ao fogo (Tabela 33).

O comportamento anisotrópico da madeira lamelada colada (MLC/GLT) foi considerado no modelo, com propriedades distintas nas direções longitudinal (x), radial (y) e tangencial (z), correspondendo às direções principais do material.

Tabela 36 - Combinações geométricas consideradas para as seções transversais das vigas de madeira

Largura (m)	Relação altura/largura	Altura (m)	Dimensão da seção (mm)
0,10	1,5	0,15	100 × 150
0,10	2,0	0,20	100 × 200
0,10	2,5	0,25	100 × 250
0,10	3,0	0,30	100 × 300
0,20	1,5	0,30	200 × 300
0,20	2,0	0,40	200 × 400
0,20	2,5	0,50	200 × 500
0,20	3,0	0,60	200 × 600

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.1.1.1 Módulos de elasticidade e relações constitutivas

O módulo de elasticidade longitudinal (E_x) foi obtido a partir dos resultados experimentais de Soriano, Pellis e Mascia (2016), sendo as demais propriedades correlacionadas segundo as expressões propostas por Moya e Baño (2017). Essas relações permitiram estimar os módulos de elasticidade nas direções transversal e radial, os módulos de cisalhamento e os coeficientes de Poisson, conforme a [Tabela 34](#).

Tabela 37 - Relações para determinação dos módulos de elasticidade, módulos de cisalhamento e coeficientes de Poisson.

Propriedade	Símbolo	Relação Empírica	Valor Relativo (em função de E_x)
Módulo de elasticidade longitudinal	E_x	-	E_x
Módulo de elasticidade radial	E_y	$\frac{E_x}{0,57}$	$0,175.E_x$
Módulo de elasticidade tangencial	E_z	$\frac{E_x}{11,07}$	$0,09.E_x$
Módulo de cisalhamento xy	G_{xy}	$\frac{E_x}{5,80}$	$0,17.E_x$
Módulo de cisalhamento yz	G_{yz}	$\frac{G_{xy}}{1,90}$	$0,09.G_{xy}$
Módulo de cisalhamento xz	G_{xz}	$\frac{G_{xy}}{1,60}$	$0,13.G_{xy}$
Coeficiente de Poisson ν_{xy}	ν_{xy}	-	0,23
Coeficiente de Poisson ν_{yz}	ν_{yz}	-	0,507
Coeficiente de Poisson ν_{xz}	ν_{xz}	-	0,419

Fonte: Adaptado de Soriano, Pellis e Mascia (2016); Moya e Baño (2017).

Os resultados encontrados e as propriedades constitutivas utilizadas na validação numérica estão expressas na [Tabela 35](#).

Tabela 38 - Propriedades constitutivas da madeira utilizadas nas simulações numéricas.

Módulo Longitudinal (MPa)			Módulo Transversal (MPa)			Coeficiente de Poisson		
E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}
12435,00	2181,58	1123,31	2144,00	1340,00	1128,40	0,507	0,419	0,135

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.1.1.2 Resistência à compressão paralela as fibras e critério de escoamento da madeira

A tensão última característica de compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi definida conforme a norma ABNT NBR 7190:1997 (tabela E.3 - Pág. 92), adotando-se o valor de 40,4 MPa (coníferas - *Pinus elliottii*). Para melhor ajuste da curva numérica carga *versus* deflexão aos resultados experimentais, o limite elástico ($f_{c0,el}$) foi estabelecido em 40 MPa.

O comportamento plástico da madeira foi simulado pelo critério de escoamento de Hill, amplamente utilizado para materiais ortotrópicos. Esse modelo distingue as regiões tracionadas e comprimidas, sendo definido a partir do módulo de elasticidade longitudinal e da resistência à ruptura. Além disso, apresenta boa estabilidade numérica e menor incidência de problemas de convergência em relação a outros modelos de falha, implementado com aceitação do software de elemento finitos.

4.1.1.3 Tensões plásticas adotadas

A tensão primária (σ_x) foi considerada igual a 50% da tensão última, resultando em 20,2 MPa. As tensões radiais (σ_y) e tangenciais (σ_z) foram tratadas como tensões plásticas transversais com valor equivalente a 25% da tensão última, conforme a ABNT NBR 7190. Já as tensões de cisalhamento plásticas foram definidas percentualmente em relação a tensão de referência σ_0 ([Tabela 36](#)).

Essas relações foram inicialmente aplicadas por Fernandes (2018) ao implementar o critério de Hill em simulações elastoplásticas, demonstrando boa correspondência entre resultados numéricos e experimentais.

Tabela 39 - Relações das tensões plásticas e tensões de cisalhamento

Direção / Plano	Valor Relativo	Percentual em relação a σ_0
Longitudinal (x)	$\sigma_x = 0,50 \cdot f_{c0,k}$	50%
Radial / Tangencial (y, z)	$\sigma_y = \sigma_z = 0,25 \cdot f_{c0,k}$	25%
Cisalhamento xy	$\tau_{xy} = 0,25 \cdot \sigma_0$	25%
Cisalhamento xz	$\tau_{xz} = 0,25 \cdot \sigma_0$	25%
Cisalhamento yz	$\tau_{yz} = 0,025 \cdot \sigma_0$	2,5%

Fonte: Adaptado de Fernandes (2018).

4.1.1.4 Relações de escoamento para o critério de Hill

As tensões plásticas equivalentes foram definidas conforme o manual do software, por meio dos coeficientes de ponderação R_{ij} , que controlam a interação entre as direções principais de tensão. Os valores de *input* empregados estão indicados na Tabela 37. A tensão de referência (σ_0) foi fixada em 50% da resistência à compressão, garantindo coerência com o modelo adotado para o comportamento elastoplástico da madeira.

Tabela 40 - Coeficientes de ponderação para tensões plásticas equivalentes

Coeficiente	Relação	Valor adotado
R_{11}	$\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$	0,50
R_{22}	$\frac{\sigma_y}{\sigma_0}$	0,25
R_{33}	$\frac{\sigma_z}{\sigma_0}$	0,25
R_{12}	$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_0}$	0,25
R_{13}	$\frac{\tau_{xz}}{\sigma_0}$	0,25
R_{23}	$\frac{\tau_{yz}}{\sigma_0}$	0,025

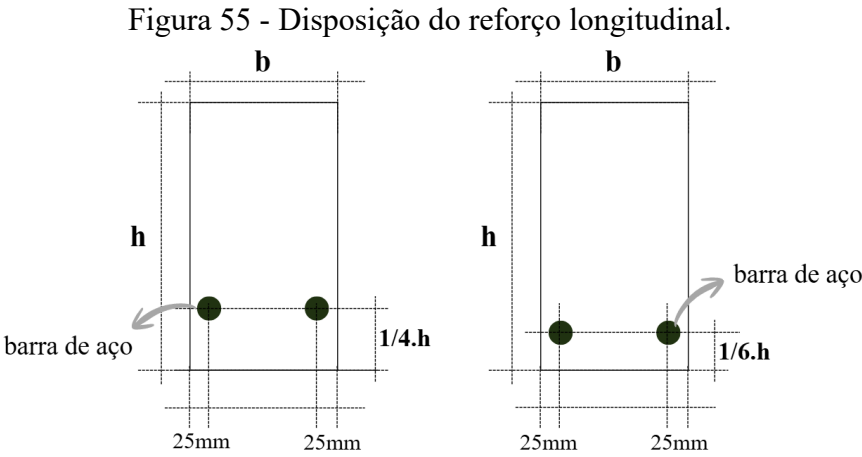
Fonte: Próprio Autor (2025).

4.1.2 Propriedades do aço e critérios de comportamento mecânico

4.1.2.1 Caracterização geométrica das armaduras

O modelo numérico considerou três diferentes diâmetros de barras de aço CA-50 utilizadas como reforço longitudinal, optando-se por 8 mm, 10 mm e 12,5 mm. A posição

geométrica das armaduras foi definida de modo a representar uma condição realista de reforço à tração, dispondo duas barras, uma em cada face lateral da viga, a partir de seus respectivos eixos a $1/4$ e a $1/6$ da face inferior em relação a altura da seção de cada elemento simulado. Com o intuito de manter uma disposição realista em termos construtivos, a dupla de barras foi disposta com cobrimento de 25mm em relação às faces laterais, como ilustrado na [Figura 55](#).



Fonte: Próprio Autor (2025).

4.1.2.2 Propriedades mecânicas do aço

O material de reforço adotado foi o aço para concreto armado CA-50, caracterizado por comportamento elastoplástico linear até o escoamento. Os valores das variáveis para simulação foram empregados para a definição desse comportamento isotrópico do aço considerando o modelo de escoamento de Von Mises, disponível na biblioteca de materiais do software. Esse critério é amplamente reconhecido por representar de forma adequada a ruptura de materiais dúcteis. Na [Tabela 38](#) estão presentes as informações acerca dos valores empregados para a simulação.

Tabela 41 - Propriedades mecânicas consideradas para o aço CA-50.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Módulo de elasticidade (Young)	E_s	210	GPa
Tensão de escoamento	f_y	500	MPa
Tensão última	f_u	540	MPa
Coefficiente de Poisson	ν_s	0,30	—
Alongamento na ruptura	ϵ_u	5	%

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.1.2.3 Influência da temperatura nas propriedades do aço

O desempenho mecânico do aço é sensivelmente afetado quando exposto a elevadas temperaturas. Sob tensão, a redução de propriedades mecânicas torna-se significativa a partir de 400 °C e sob compressão, a degradação inicia-se em torno de 100 °C.

No presente estudo, as barras de aço foram posicionadas exclusivamente na região tracionada das vigas, conforme a [Figura 55](#), para que dessa forma, o material mantenha suas propriedades originais até atingir a temperatura isotérmica de 300 °C, correspondente ao limite da camada carbonizada da madeira.

Essa consideração foi feita para assegurar que o aço preserve seu módulo de elasticidade e capacidade resistente dentro da faixa de temperatura em que o comportamento termomecânico do sistema é analisado.

4.1.2.4 Critério de ruptura e modelo de comportamento

O critério de von Mises foi empregado para representar o escoamento plástico e a ruptura do aço, uma vez que esse modelo fornece uma descrição precisa do comportamento de materiais metálicos dúcteis sob estados de tensão multiaxiais. O critério baseia-se na energia de distorção e é expresso, de forma simplificada, pela [Equação \(25\)](#):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (25)$$

Onde σ_{eq} é a tensão equivalente de von Mises, e $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ representam as tensões principais atuantes. O escoamento ocorre quando $\sigma_{eq} \geq f_y$.

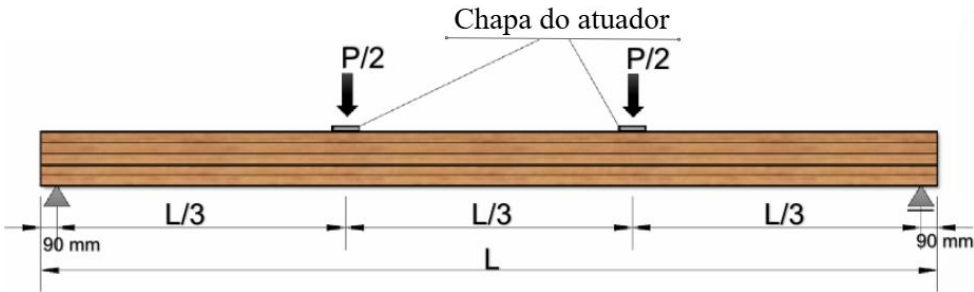
A aplicação deste critério no software permite capturar o comportamento plástico das barras de aço nas regiões mais solicitadas da viga, avaliando a compatibilidade termomecânica com a madeira e com as condições de aquecimento impostas nas análises de incêndio.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Validação do estudo experimental em temperatura ambiente

As simulações numéricas de validação da primeira etapa foram conduzidas empregando o método dos elementos finitos para avaliar o comportamento termomecânico de vigas de madeira lamelada colada (Glulam) reforçadas com barras de aço. O modelo foi concebido de modo a representar de forma fidedigna as condições experimentais de flexão em quatro pontos conforme a [Figura 56](#).

Figura 56 - Modelo de flexão a 4 pontos.



Fonte: Padilha *et al.* (2025).

4.2.1.1 Variáveis de estudo de Soriano, Pellis e Mascia (2016)

Três parâmetros principais foram considerados, comprimento da viga, diâmetro das barras de reforço e tempo de exposição ao fogo. Para melhor entendimento, as combinações foram codificadas na forma (C–B–T), como organizado na [Tabela 36](#).

Tabela 42 - Parâmetros de estudo Soriano, Pellis e Mascia (2016).

Parâmetro	Código	Valores Considerados	Descrição
Comprimento da viga (m)	C	C3, C4, C5	3, 4 e 5 metros
Diâmetro das barras (mm)	B	B8, B10, B12.5	8, 10 e 12,5 milímetros
Tempo de exposição ao fogo (min)	T	T30, T60	30 e 60 minutos

Fonte: adaptado de Soriano, Pellis e Mascia (2016).

4.2.1.2 Condições de apoio e carregamento

O modelo considerou um apoio simples localizado a 90 mm da extremidade da viga, e a aplicação de uma carga concentrada $\frac{P}{2}$ a uma distância igual a $\frac{L}{3}$ do apoio, conforme ilustrado

na [Figura 56](#). A transmissão da carga foi realizada por meio de placas de aço (chapa do atuador) com dimensões de 75×52 mm e 15 mm de espessura, responsável pela distribuição uniforme das tensões na região de contato.

4.2.1.3 Estratégia de análise mecânica

A análise não-linear inicial teve por objetivo determinar os deslocamentos em relação a carga aplicada no ponto $\frac{l}{200}$ (limite de serviço), conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 7190:1997. A análise não linear foi resolvida por meio do método iterativo de Newton-Raphson, descrito pelas [Equações 26 e 27](#).

$$R_i = K_i \cdot \Delta u_i \quad (26)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i \quad (27)$$

Em cada iteração, foram calculados o vetor de forças não equilibradas (R_i) e a matriz de rigidez tangente (K_i), os quais atualizavam o vetor incremental de deslocamentos (Δu_i) até atingir a convergência numérica. A [Tabela 40](#) apresenta os parâmetros de incremento aplicados na análise automática.

Tabela 43 - Parâmetros de incrementos.

Parâmetro	Valor
Número máximo de incrementos	500
Incremento inicial	0,01
Incremento mínimo	$1E^{-5}$
Incremento máximo	0,1
Critérios de parada	Convergência de reações e carga máxima, ou não convergência por falha do material

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.1.4 Condições de contorno e interações em temperatura ambiente

No elemento projetado, foram implementadas condições de contorno que restringiram todas as translações nos apoios, sendo um apoio totalmente inepto, e outro permitindo rotação no plano XY (plano de deslocamento vertical) em torno do eixo Z.

Quanto as interações entre as partes, considerou-se as configurações segundo descrito na [Tabela 41](#).

Tabela 44 - Condições de contorno e interações.

Tipo de Interação	Descrição	Configuração
<i>Coupling</i>	Acoplamento entre a carga e a placa	Aplicação controlada via ponto de referência (RP)
<i>Tie</i>	Vinculação entre a placa (escrava) e a viga (mestre)	Transferência total de deformações e tensões
<i>Embedded</i>	Interação embutida entre a viga e as barras de aço	Compatibilização dos deslocamentos internos

Fonte: Próprio Autor (2025).

O tipo de interação *coupling* é utilizado para vincular o movimento de um conjunto de nós (*slave*) a um nó ou ponto de referência (*master node* ou *reference point*), já a interação *tie* tem por finalidade conectar duas superfícies distintas, fazendo com que não haja deslizamento entre elas. Por fim, a interação *embedded* insere uma estrutura interna (*embedded region*) dentro de outra (*host region*), onde a região embutida segue os deslocamentos da matriz hospedeira.

4.2.1.5 Discretização e elementos finitos para a análise mecânica

A malha de elementos finitos foi gerada com tamanho médio de 20 mm, buscando equilíbrio entre precisão e custo computacional. Foram utilizados elementos sólidos hexaédricos com interpolação linear e integração completa, disponíveis na biblioteca do software sob a designação C3D8 (8 nós externos e 8 pontos de integração internos). Para o caso das barras de aço, fora utilizado elementos de treliça com dois nós sob a alcunha de T3D2, também disponibilizado nas configurações do programa.

A análise foi concluída quando a convergência entre as reações nodais e a carga aplicada foi atingida, ou quando a não convergência indicou o colapso estrutural por falha do material. Os diferentes componentes do modelo foram representados na [Tabela 42](#).

Tabela 45 - Discretização dos elementos finitos.

Componente	Tipo de Elemento	Descrição
Viga de madeira	C3D8	Elementos sólidos hexaédricos com integração completa
Placa de aço do atuador	C3D8	Elementos sólidos para distribuição da carga
Barras de reforço em aço	T3D2	Elementos de treliça com dois nós

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.1.6 Aderência do adesivo: Hipótese simplificadora

As propriedades de aderência entre as barras de aço e a madeira, bem como o comportamento mecânico desses materiais sob elevadas temperaturas, foram considerados como não influenciando o modo de falha da madeira. A mesma premissa foi aplicada à cola empregada entre as lâminas do material. Conforme os resultados obtidos por Klippel e Fontana (2011) em ensaios de tração e análises de ruptura em juntas dentadas, verificou-se que a resistência à flexão exerce papel mais relevante que a resistência ao cisalhamento entre as camadas na determinação da resistência ao fogo. De modo análogo, Soriano, Pellis e Mascia (2016) identificaram que, nos testes de flexão a falha ocorria majoritariamente na própria madeira.

Com o aumento da temperatura, tanto a resistência quanto o módulo de elasticidade da madeira reduzem-se progressivamente, tornando-se praticamente nulos quando a camada atinge completa carbonização, a cerca de 300 °C. Para representar esse efeito, empregou-se o método analítico simplificado (Equação 28) apresentado na EN 1995-1-2:2004, o qual permite a redução da seção transversal e a consideração da parte remanescente com suas propriedades mecânicas e elásticas preservadas.

$$e_f = e_{carb} + 7k_0 \text{ [mm]} \quad (28)$$

4.2.1.7 Validação do modelo em temperatura ambiente

O modelo numérico foi validado com base nos resultados experimentais obtidos por Soriano, Pellis e Mascia, (2016) para a viga de madeira reforçada RGlulam2-2. As propriedades geométricas e mecânicas empregadas na simulação estão resumidas na Tabela 43.

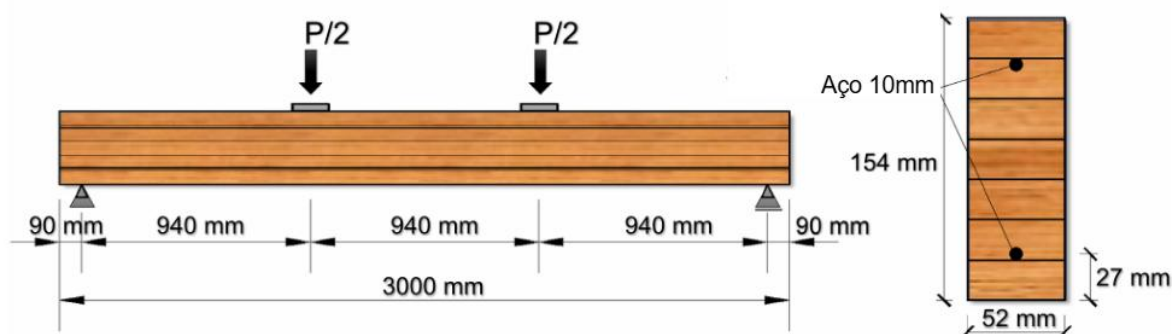
Tabela 46 – Propriedades e condições de ensaio da viga RGlulam2-2.

Parâmetro	Símbolo/ Descrição	Valor
Módulo de elasticidade médio da madeira	E_x	12.435 MPa
Largura da seção	b	52 mm
Altura da seção	h	154 mm
Comprimento total	l	3000 mm
Distância dos apoios às extremidades	-	90 mm
Posição dos pontos de aplicação de carga	-	1030 mm de cada apoio
Diâmetro das barras de aço	-	10 mm
Região de posição das barras	-	1ª - tracionada; 2ª - região comprimida

Fonte: Próprio Autor (2025).

Durante o ensaio, a viga foi submetida a carregamento em dois pontos simétricos, apoiada a 90 mm de cada extremidade. O reforço consistiu em duas barras de aço de 10 mm de diâmetro, sendo uma instalada na zona de tração e a outra na zona de compressão, conforme ilustrado na [Figura 57](#).

Figura 57 - Características viga RGlulam2-2



Fonte: Adaptado de Padilha *et al.* (2025).

4.2.1.8 Correlação entre as abordagens e o comportamento estrutural

É relevante salientar que o software utilizado disponibiliza duas metodologias distintas para a realização dos ensaios numéricos. A primeira consiste na aplicação de cargas concentradas em um ponto de referência, a partir do qual essas cargas são distribuídas uniformemente sobre determinados elementos. A segunda abordagem baseia-se na imposição de deslocamentos nesses mesmos pontos de referência, em substituição à aplicação direta de cargas. A distinção entre essas estratégias é fundamental para a adequada interpretação da curva de resposta estrutural, uma vez que na primeira metodologia a curva “carga *versus* deslocamento” é obtida a partir do cálculo dos deslocamentos resultantes das cargas aplicadas, enquanto na segunda, a mesma relação é construída com base nas reações de força geradas pelos deslocamentos impostos.

De modo geral, a aplicação de carga controlada (*Load Control*) tende a produzir resultados mais estáveis e precisos no regime elástico da curva. Isso ocorre porque, nesse estágio, a relação entre carga e deslocamento é praticamente proporcional, permitindo que o algoritmo de incremento mantenha uma boa taxa de convergência e caminho de solução suave.

Por outro lado, quando a estrutura entra no regime plástico, seja por plastificação do material ou mesmo instabilidade geométrica, o controle por carga pode levar a instabilidades

numéricas, pois pequenos aumentos de carga podem provocar grandes variações de deslocamento. Nesses casos, o método pode falhar ao tentar encontrar equilíbrio, especialmente quando a curva “carga *versus* deslocamento” apresenta *softening* (perda de rigidez após o pico de carga).

4.2.1.9 Resultados da validação em temperatura ambiente

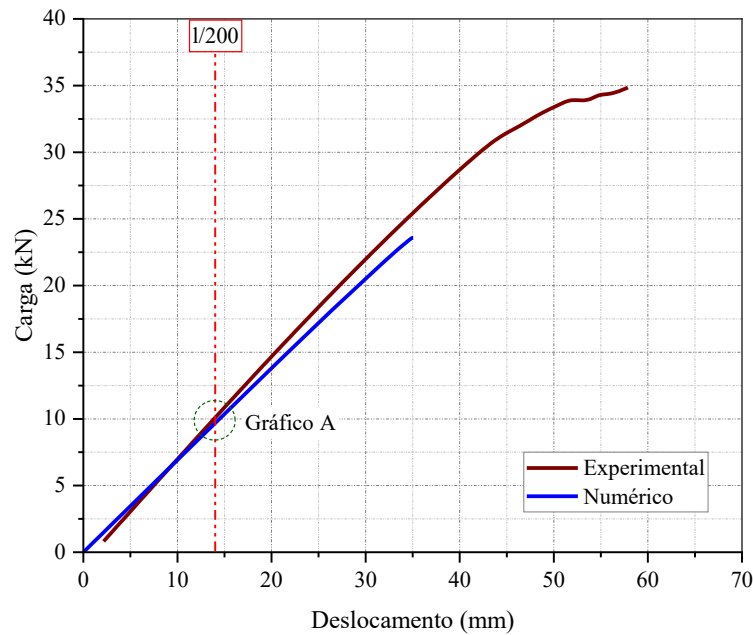
Os resultados obtidos na análise numérica por meio da abordagem de aplicação de carga controlada em comparação com os dados experimentais são apresentados na [Figura 58](#), sendo a [Figura 59](#) uma ampliação da região elástica de interesse, de modo a evidenciar com maior clareza a estreita faixa entre os resultados obtidos.

Verificou-se que a convergência do modelo numérico para a carga correspondente ao deslocamento de $\frac{l}{200}$ foi aproximadamente 4,36% inferior à observada experimentalmente, diferença que está dentro do limite de aceitabilidade de 10%. Especificamente para esse ponto, os valores de carga obtidos foram de 10,1 kN (experimental) e 9,65 kN (numérico).

Nessa abordagem, em que a força é aplicada diretamente ao ponto de referência, observa-se que a curva do resultado do processamento numérico não se desenvolve após o regime elástico. Esse comportamento decorre justamente das características do processamento adotado no modelo, no qual o incremento de carga é controlado de forma incremental até o limite de convergência numérica. Ao passo que a estrutura se aproxima do regime plástico, associada ao início do escoamento, o algoritmo de solução tende a reduzir automaticamente o tamanho dos incrementos de carga para manter a estabilidade da análise. Quando o incremento mínimo especificado é atingido sem que haja convergência, o processamento é interrompido antes da completa representação do comportamento plástico. Logo, o processamento gerou a porção inicial da curva “carga *versus* deslocamento”, correspondente ao regime elástico.

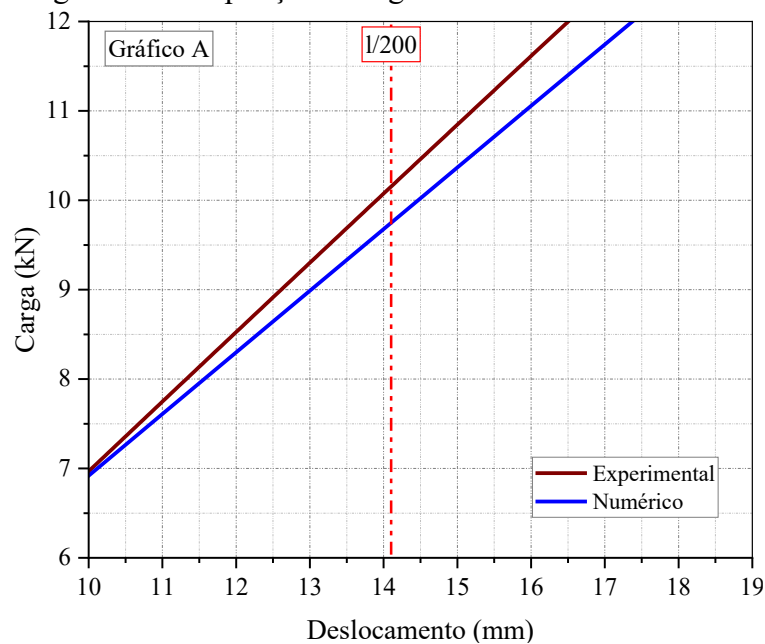
A ausência do trecho correspondente ao escoamento na curva numérica não compromete o processo de validação do modelo, uma vez que o ponto de interesse para comparação entre os resultados experimental e numérico situa-se em $\frac{l}{200}$. Nesse intervalo, o comportamento do material apresenta apenas pequenas não linearidades iniciais, o que permite uma correlação confiável entre os deslocamentos e as cargas obtidas em ambos os modelos. A interrupção do processamento antes do escoamento não afeta a precisão da análise comparativa, garantindo que a validação seja realizada em uma faixa de resposta estrutural fisicamente consistente e representativa do desempenho real da viga no estágio inicial de carregamento.

Figura 58 - Comparação de resultados do modelo experimental e numérico em $\frac{l}{200}$.



Fonte: Próprio Autor (2025).

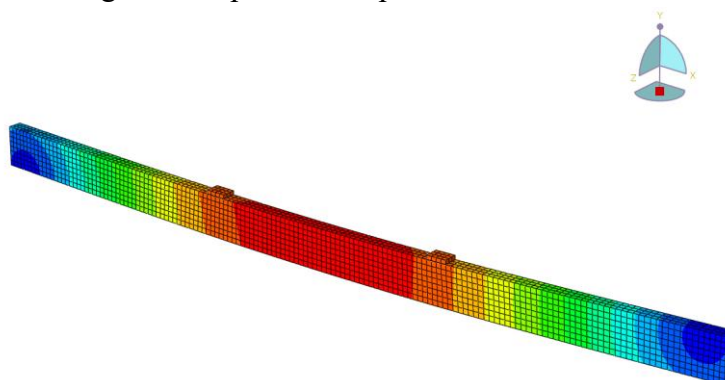
Figura 59 - Ampliação da região de interesse de dados.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 60 apresenta o elemento virtual (viga) desenvolvido tal qual o modelo experimental (Figura 57) descrito por Soriano, Pellis e Mascia (2016). A distribuição de cores exibida na figura representa o campo de deslocamentos verticais, evidenciando o comportamento típico de flexão ao longo do vão da viga.

Figura 60 - Viga virtual processada pelo método de controle de carga.



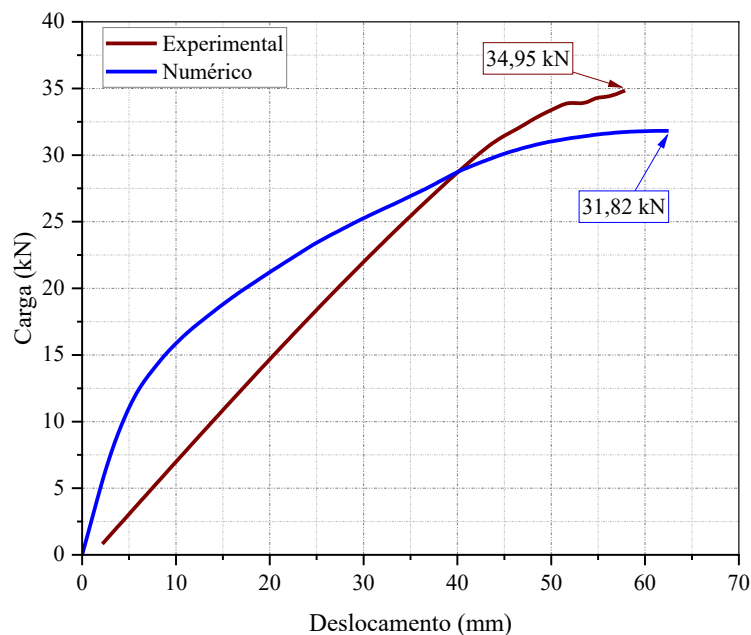
Fonte: Próprio Autor (2025).

Observa-se a simetria da deformação e a ocorrência de maiores deslocamentos na região central, compatíveis com as condições de carregamento aplicadas. Essa configuração confirma a coerência do modelo numérico desenvolvido, demonstrando sua capacidade de reproduzir o comportamento estrutural observado no ensaio experimental.

Não obstante, fora realizada uma análise complementar do modelo numérico empregando-se a segunda abordagem, baseada na aplicação de deslocamentos prescritos, com o objetivo de avaliar o comportamento do elemento estruturante no regime plástico no ponto de ruptura. Conforme indicado na curva experimental, a viga atingiu a ruptura sob uma carga de 34,95 kN, correspondente a um deslocamento aproximado de 58 mm. Assim, no modelo numérico, adotou-se a aplicação de um deslocamento prescrito de 70 mm, de modo a conduzir a simulação até a fase de colapso estrutural e possibilitar a comparação direta com o comportamento observado experimentalmente. A [Figura 61](#) apresenta o comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios experimental e numérico, evidenciando a correlação entre as respostas em seus pontos de ruptura.

O último ponto de convergência obtido no modelo numérico indicou a ocorrência de ruptura no trecho não linear da curva, correspondente a uma carga de 31,82 kN, o que representa uma diferença de 8,69% em relação ao valor experimental. Ainda para o modelo numérico, a ruptura da viga ocorreu com 62,5 mm de deslocamento, representando uma variação de 7,2% em relação ao deslocamento encontrado no ensaio experimental. Portanto, os resultados obtidos confirmam a adequação da abordagem baseada na aplicação de deslocamentos prescritos, evidenciando a coerência do método numérico adotado e sua capacidade de reproduzir de forma satisfatória o comportamento observado experimentalmente.

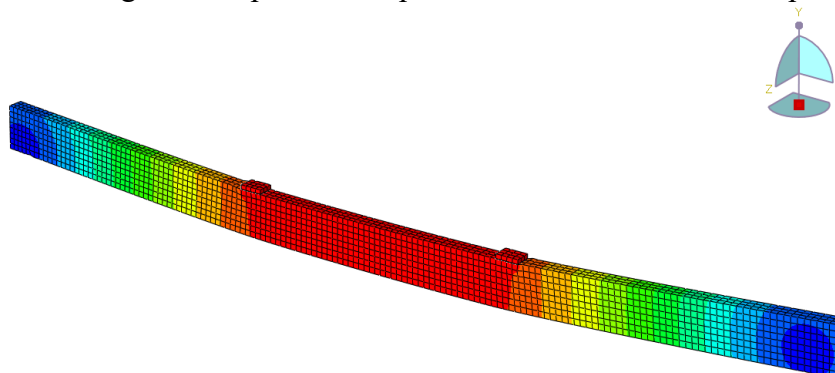
Figura 61 - Comparação dos resultados experimental e numérico no último ponto de convergência (ruptura).



Fonte: Próprio Autor (2025).

De forma análoga, a [Figura 62](#) também apresenta o elemento virtual projetado conforme o experimental. O campo dos deslocamentos verticais evidencia a similaridade de comportamento entre o modelo que considera a abordagem por incrementos de carga controlada ([Figura 60](#)) e o método de deslocamento prescrito.

Figura 62 - Viga virtual processada pelo método de deslocamento prescrito.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A [Figura 63](#) apresenta o modelo físico de ruptura da viga RGlulam2-2. Observa-se a formação de uma zona de esmagamento na face superior (zona de compressão), resultante da ação da carga aplicada, enquanto na face inferior (zona de tração), ocorre a ruptura do elemento.

De acordo com o autor, o comportamento observado caracteriza-se por uma combinação de falhas por tração e compressão, típicas de vigas reforçadas.

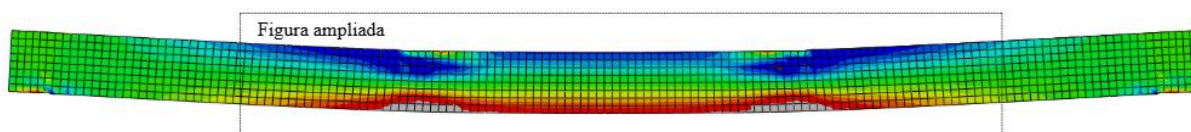
Figura 63 - Falha viga RGlulam2-2.



Fonte: Soriano, Pellis e Mascia (2016).

No modelo computacional, o ponto de ruptura do elemento foi identificado por meio da análise das tensões longitudinais atuantes na viga projetada. Para essa avaliação, foram definidas configurações específicas na ferramenta de visualização “*Contour Plot Options*”, com os limites de tensão previamente estabelecidos na subseção 4.1.1.2. Nessa etapa, a tensão última característica de compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi adotada como 40,4 MPa, enquanto o limite elástico ($f_{c0,el}$) foi fixado em 40 MPa. A partir dessas configurações, obteve-se a representação gráfica mostrada na Figura 64.

Figura 64 - Distribuição das tensões longitudinais no modelo numérico da viga.



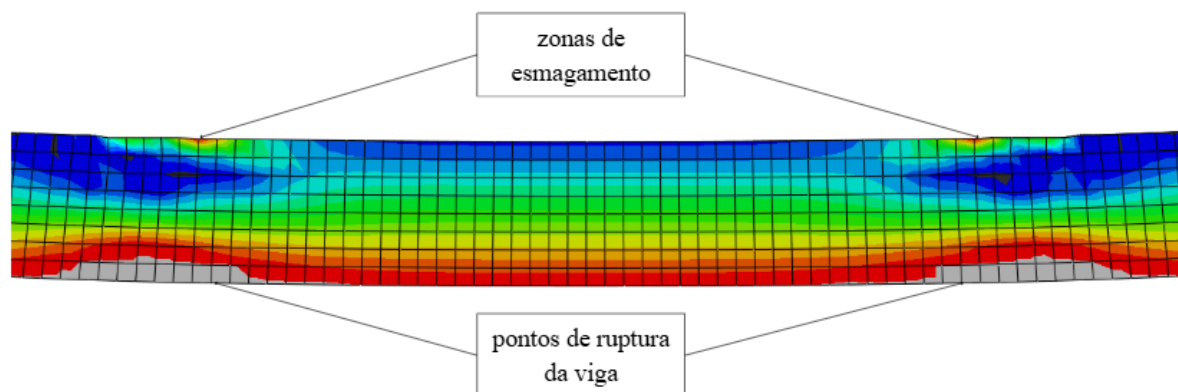
Fonte: Próprio Autor (2025).

Nota-se que a região de concentração de tensões compressivas, indicada pela coloração mais clara na zona superior, coincide com a área de esmagamento observada experimentalmente. Essa correspondência demonstra que o modelo computacional foi capaz de prever com boa precisão a localização e o modo de ruptura do material, validando a calibração dos parâmetros mecânicos e a fidelidade da modelagem. Além disso, o modelo mostra coerência com o comportamento não linear esperado, indicando adequada representação do gradiente de tensões e da interação entre as zonas tracionadas e comprimidas.

No modelo numérico, observa-se que a zona de tração na face inferior da viga apresenta uma região de elevada concentração de tensões, representada pela coloração avermelhada. Essa área coincide precisamente com o local onde, no modelo físico, ocorreu a fissuração longitudinal da madeira, indicando a ruptura por tração paralela às fibras. A correspondência entre a zona crítica observada experimentalmente e a região de maior intensidade de tensões no modelo computacional evidencia a capacidade preditiva do método de elementos finitos, reproduzindo com exatidão o comportamento estrutural da viga.

Além disso, a área de coloração acinzentada no modelo computacional representa o ponto de ruptura máxima, onde as tensões ultrapassam o limite resistente do material, caracterizando a falha definitiva por tração. Essa previsão numérica coincide com a propagação da fissura observada no ensaio físico, demonstrando que o modelo conseguiu não apenas identificar o local de início da ruptura, mas também representar adequadamente o mecanismo de falha e a transição entre as zonas comprimidas e tracionadas do elemento. A [Figura 65](#) apresenta a área de tensões ampliada, permitindo uma melhor visualização dos resultados obtidos.

Figura 65 - Detalhe da região de maior concentração de tensões no modelo numérico.



Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.1.10 Conclusões em relação a validação em temperatura ambiente

A metodologia empregada na validação do modelo numérico para temperatura ambiente, demonstra a consistência e a confiabilidade da modelagem em elementos finitos aplicada às vigas de madeira reforçadas com barras de aço. O processo de validação comparou de forma direta os resultados experimentais obtidos por Soriano, Pellis e Mascia (2016), assegurando que as condições de contorno, carregamento e propriedades dos materiais fossem reproduzidas de forma correta. O emprego do método de Newton-Raphson para a resolução da

análise não linear permitiu capturar com precisão o comportamento progressivo da viga até a ruptura, assegurando estabilidade e coerência no processo iterativo de convergência.

Os métodos de validação adotados englobaram a calibração das propriedades mecânicas e a reprodução das condições de ensaio de flexão a quatro pontos, conforme os parâmetros descritos na [Tabela 41](#). A comparação entre os resultados experimentais e numéricos revelou diferenças inferiores a 10% tanto para a carga máxima quanto para os deslocamentos no meio do vão, valor considerado aceitável segundo os critérios normativos e a literatura técnica. Essa proximidade entre os resultados evidencia a eficiência do modelo numérico em representar as propriedades anisotrópicas da madeira e o efeito de interação com o aço, reforçando a adequação dos modelos constitutivos adotados (Hill e von Mises) e dos parâmetros de discretização empregados.

A coerência entre os campos de tensão obtidos numericamente e as zonas de falha identificadas experimentalmente confirma a capacidade preditiva do modelo. A [Figura 63](#), referente ao ensaio físico, e a [Figura 64](#), correspondente à simulação computacional, apresentam notável semelhança quanto à localização e ao modo de ruptura. Essa correspondência demonstra que o modelo foi capaz de reproduzir com exatidão a distribuição de tensões longitudinais e o comportamento não linear do material até o colapso, evidenciando que as hipóteses de aderência e contato entre os materiais foram satisfatoriamente representadas.

Tabela 47 - Comparativo entre os resultados experimentais e numéricos para a viga RGlulam2-2.

Parâmetro	Experimental	Numérico	Diferença (%)
L/200 - Carga (kN)	10,10	9,65	4,36
Ruptura - Carga máxima (kN)	34,95	31,82	8,69
Ruptura - Deslocamento (mm)	58,00	62,50	7,20

Fonte: Próprio Autor (2025).

Outro aspecto relevante foi a correta previsão das zonas de concentração de tensões. O modelo computacional identificou a área de maior solicitação tracionada (zona cinza), coincidente a falha observada no ensaio físico, e a região de zona avermelhada, correspondente fissuração longitudinal do modelo experimental. Essa coerência entre os modos de falha físicos e numéricos legitima a formulação constitutiva adotada para a madeira ortotrópica (critério de Hill) e para o aço (von Mises), para representar a interação entre os materiais.

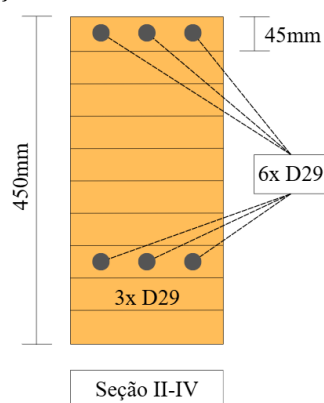
Dessa forma, conclui-se que o modelo numérico proposto foi devidamente validado, apresentando correlação direta e consistente com os resultados experimentais. A metodologia

empregada, que combinou a análise não linear com a calibração precisa das propriedades físicas e geométricas, garantiu a fidelidade da simulação. Essa validação em temperatura ambiente estabelece uma base sólida para a continuidade do estudo, sobretudo para as análises termoestruturais em condições elevadas de temperatura, assegurando que o modelo possa ser extrapolado com confiabilidade às situações de incêndio.

4.2.2 Validação do estudo experimental em altas temperaturas

Para a validação da segunda etapa, foi conduzido um modelo térmico pretendendo-se calibrar o software para o modelo expresso segundo o estudo de Matsushita e Shioya (2023b), onde os autores conduziram avaliações do desempenho ao fogo de vigas mistas constituídas por madeira *Cryptomeria japonica* e reforçadas com barras de aço, as quais foram submetidas a ensaios experimentais de queima em escala real. A [Figura 66](#) apresenta a seção transversal principal do trabalho desenvolvido pelos autores.

Figura 66 - Seção transversal do modelo térmico físico.



Fonte: Adaptado de Matsushita e Shioya (2023b).

4.2.2.1 Variáveis de estudo - Matsushita e Shioya (2023b)

A seção principal que é contemplada no estudo, que corresponde a seção II-IV, é composta por lâminas de madeira de 45mm e barras de aço com diâmetro nominal de 29mm da classe SD390, que foram embutidas tanto na região superior quanto na inferior da seção transversal da viga. Na [Tabela 45](#) apresenta-se a organização da descrição das variáveis do estudo experimental.

Tabela 48 - Parâmetros do estudo de Matsushita e Shioya (2023b).

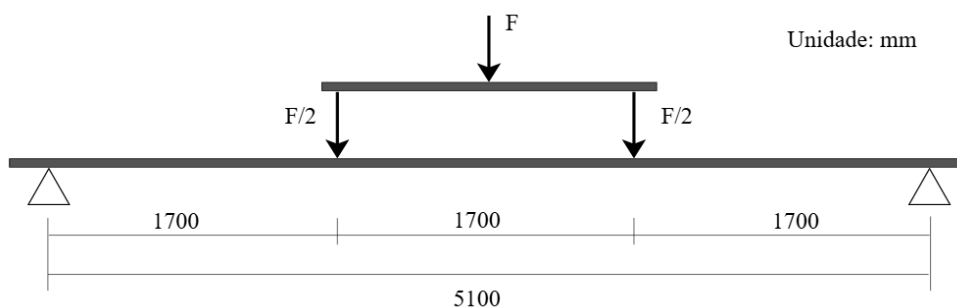
Parâmetro	Código	Valores Considerados	Descrição
Comprimento da viga (m)	C	C3	Vigas de 3 metros de comprimento foram utilizadas nos ensaios de queima.
Diâmetro das barras (mm)	D	D29	Barras de aço com diâmetro de 29 mm (tipo D29, classe SD390, com tensão de escoamento nominal de 390 N/mm ²).
Tempo de exposição ao fogo (min)	T	T60	Exposição contínua ao fogo por 60 minutos, seguindo a curva padrão ISO 834-1.

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.2.2 Esquema genérico de carregamento e apoio

O modelo físico contemplou um vão entre apoios de 5100 mm com aplicação de uma carga concentrada $\frac{P}{2}$ distanciadas igualmente a $\frac{L}{3}$ dos apoios, como ilustrado na [Figura 67](#). A seção considerada ([Figura 66](#)) foi de 450x210 mm, com 6 barras de aço separadas em duas camadas de 3 barras cada, localizadas a 112 mm e 427,5 mm em relação a face inferior da seção transversal. O distanciamento em relação a face lateral (recobrimento) da viga foi de 35 mm com 70mm entre cada barra.

Figura 67 - Esquema de distribuição de forças.



Fonte: Adaptado de Matsushita e Shioya (2023b).

4.2.2.3 Estratégia de análise para validação

A validação do modelo numérico em condições de altas temperaturas abrange a avaliação da degradação térmica da madeira, com foco na perda progressiva da seção transversal decorrente do processo de carbonização durante a exposição ao fogo. Para esse fim, foi conduzida uma análise térmica transiente em ambiente numérico, considerando o fluxo de

calor incidente, as propriedades térmicas e físicas da madeira em função da temperatura e a taxa de formação da camada carbonizada.

O procedimento de validação realizou-se de forma iterativa, ajustando-se os parâmetros térmicos, tais como condutividade térmica, calor específico, perda progressiva de densidade e coeficiente convectivo tal qual os preceitos estabelecidos pela norma EN 1995-1-2:2004. A curva de incêndio padrão ISO-834 foi utilizada como parâmetro para queima, até que a evolução temporal da temperatura e da profundidade de carbonização reproduzisse, de maneira satisfatória, os resultados experimentais obtidos no estudo de referência.

Buscou-se assegurar a compatibilidade entre o comportamento simulado e o observado em ensaios de queima em escala real, de modo que o modelo fosse capaz de representar adequadamente os fenômenos de degradação térmica e a consequente redução da capacidade resistente da viga. Essa etapa foi essencial para validar o modelo numérico como uma ferramenta confiável na previsão do desempenho termoestructural de elementos híbridos em condições de incêndio.

4.2.2.4 Atributos iniciais do modelo numérico

A configuração do modelo térmico no software contempla parâmetros físicos fundamentais que asseguram a coerência das equações de transferência de calor e a correta conversão entre escalas termodinâmicas. Entre esses parâmetros está a temperatura do zero absoluto, fixada em $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, que representa a condição de ausência total de energia térmica no sistema (0 K). Essa constante é essencial para que o programa interprete corretamente as propriedades dependentes da temperatura, permitindo que os cálculos de energia interna e fluxo térmico sejam realizados em escala absoluta. Assim, a definição dessa referência física garante consistência na formulação matemática dos fenômenos térmicos, especialmente em simulações que envolvem grandes variações de temperatura, como as de queima e carbonização da madeira.

Outro parâmetro necessário a ser configurado no modelo é a constante de Stefan–Boltzmann, adotada com o valor de $5,669 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$, a qual rege os cálculos de radiação térmica entre superfícies. Essa constante integra a equação de emissão radiativa, que relaciona o fluxo de calor ao quarto grau da temperatura absoluta da superfície. A inclusão dessa constante permite ao modelo reproduzir de maneira precisa os efeitos de emissão e absorção de energia térmica por radiação, que se tornam dominantes em situações de exposição ao fogo. Dessa forma, a formulação numérica passa a contemplar não apenas os mecanismos de

condução e convecção, mas também as trocas radiativas, garantindo uma representação realista do balanço térmico durante o aquecimento da viga.

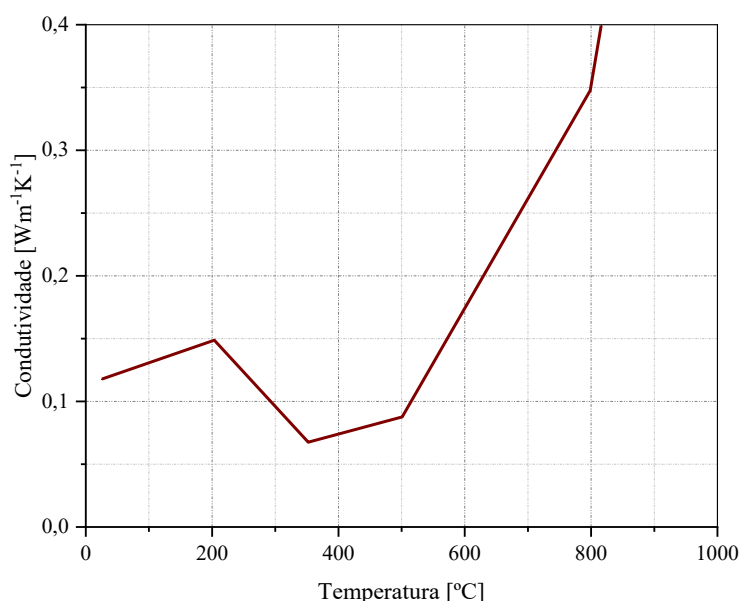
4.2.2.5 Propriedades térmicas da madeira

4.2.2.5.1 Condutividade térmica

Para a definição das propriedades de condutividade térmica da madeira, foram adotados os preceitos estabelecidos pela norma europeia EN 1995-1-2:2004, que trata do comportamento estrutural de elementos de madeira sob exposição ao fogo. Essa norma fornece as diretrizes para a consideração dos efeitos térmicos, incluindo a degradação das propriedades do material em função da temperatura, e apresenta faixas recomendadas de condutividade térmica para diferentes regimes de aquecimento.

As configurações referentes à condutividade térmica foram determinadas a partir do ábaco normatizado apresentado na [Figura 68](#). Esse diagrama permite estimar o comportamento dependente da temperatura desse parâmetro, possibilitando que o modelo numérico represente de forma contínua a variação da capacidade de condução térmica da madeira durante o aquecimento. A utilização dessas curvas é essencial para capturar o fenômeno de carbonização progressiva, no qual a condutividade térmica tende a diminuir com a formação da camada carbonizada. Os valores de entrada para configuração no software estão descritos na [Tabela 46](#).

Figura 68 - Ábaco de condutividade térmica.



Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

Tabela 49 - Relação entre temperatura e condutividade térmica para madeira e camada carbonizada.

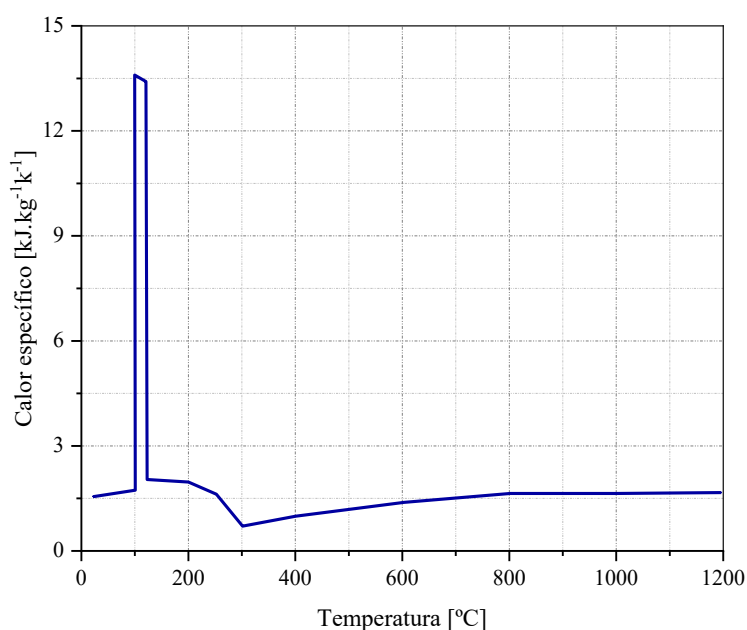
Temperatura (°C)	Condutividade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

4.2.2.5.2 Calor específico

De forma análoga, a norma europeia EN 1995-1-2:2004 estabelece os preceitos normativos para a determinação do calor específico da madeira em condições de exposição ao fogo, conforme representado no ábaco da [Figura 69](#). Esse parâmetro é essencial para a caracterização do comportamento térmico do material, uma vez que expressa a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura unitária da massa de madeira, influenciando diretamente o gradiente térmico interno durante o aquecimento.

Figura 69 - Ábaco de relação entre calor específico e temperatura para madeira.



Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

Observa-se no gráfico que o calor específico apresenta uma elevação acentuada nas faixas de temperatura entre 100 °C e 200 °C, comportamento associado à vaporização da umidade interna da madeira, fenômeno que demanda elevada quantidade de energia. Após essa

fase, o valor do calor específico sofre uma redução, estabilizando-se em níveis inferiores à medida que a temperatura aumenta e a estrutura lignocelulósica se degrada progressivamente. Em temperaturas superiores a aproximadamente 400 °C, o material já se encontra em processo avançado de pirólise, apresentando valores relativamente constantes até cerca de 1200 °C. Essa variação evidencia a natureza termicamente dependente das propriedades da madeira, devendo ser considerada no modelo numérico para a representação do comportamento térmico durante a carbonização. A [Tabela 47](#) traz os valores de entrada para o calor específico que foram configurados no software.

Tabela 50 - Relação entre temperatura e calor específico para madeira.

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

4.2.2.5.3 Densidade

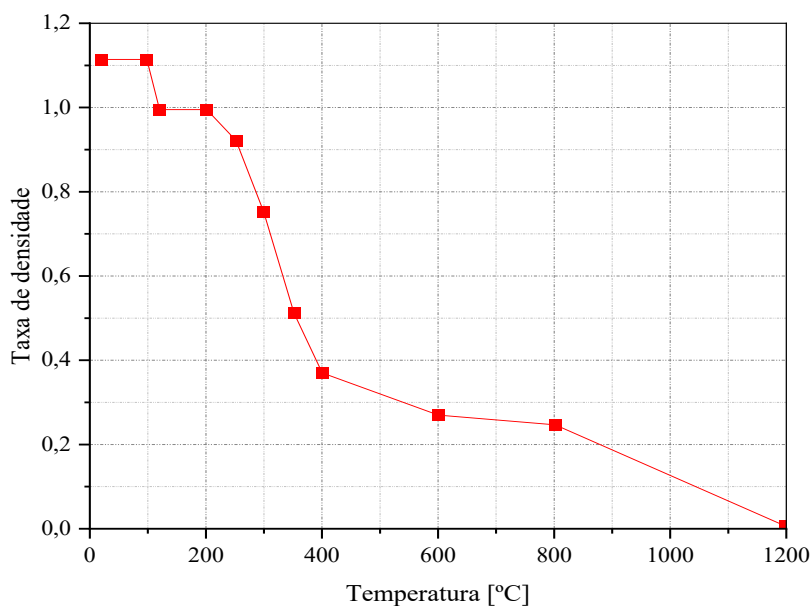
A definição das propriedades da densidade da madeira em função da temperatura também seguiu, também, as recomendações da norma EN 1995-1-2:2004. A densidade da *Cryptomeria japonica* foi extraída do estudo de Anshari (2010), onde a faixa de valores determinada está entre 300 a 420 kg/m³. No modelo numérico, essa propriedade foi implementada como uma função dependente da temperatura, permitindo que seja atualizado automaticamente o valor da densidade a cada incremento térmico durante o processamento. Dessa forma, o modelo passa a representar a redução gradual da massa específica da madeira à medida que a temperatura aumenta, assegurando maior precisão no cálculo da condução de calor e na previsão da carbonização. A [Tabela 48](#) elenca os valores calibrados que foram utilizados para o processamento e a [Figura 70](#) demonstra a relação entre a taxa de densidade e temperatura.

Tabela 51 - Relação entre temperatura e taxa de densidade.

Temperatura (°C)	Densidade (kg/m³)
20	300,00
98	299,70
99	299,40
120	298,50
200	297,00
250	279,00
300	228,00
350	156,00
400	114,00
600	84,00
800	78,00
1200	0,30

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

Figura 70 - Ábaco de relação entre taxa de densidade e temperatura para madeira.



Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2:2004 (Eurocode 5).

4.2.2.6 Propriedades térmicas do aço CA-50

4.2.2.6.1 Condutividade térmica (λ)

A condutividade térmica do aço CA-50 encontra-se tipicamente em uma faixa entre 45 a 52 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à temperatura ambiente e decresce com o aquecimento. Para análises de incêndio e simulações acopladas, adota-se uma tabela temperatura-dependente ($\lambda(T)$) conforme EN 1993-1-2 e referenciada na NBR 14323, pois a redução de λ com T altera o gradiente

térmico e a difusividade térmica do elemento estrutural. Os dados de inserção no software são detalhados na [Tabela 49](#).

Tabela 52 - Relação de condutividade térmica e temperatura do aço.

Temperatura (°C)	Condutividade λ (W/m · K)
20	50
100	47
200	44
400	37
600	30
800	25
1000	20

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2:2004 e NBR 14323.

4.2.2.6.2 Calor específico (c)

O calor específico do aço aumenta com a temperatura e parte de valores típicos de aproximadamente $470 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a 20°C e sobem significativamente até temperaturas elevadas. A inserção dos dados do calor específico (c) no software é necessária para cálculo de massa térmica e para previsões de elevação de temperatura em análises transientes. Os valores inseridos estão descritos na [Tabela 50](#).

Tabela 53 - Relação entre calor específico e temperatura do aço.

Temperatura (°C)	Calor específico (J/kg · K)
20	470
100	490
200	510
400	560
600	650
800	750
1000	800

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2:2004 e NBR 14323.

4.2.2.6.3 Densidade (ρ)

A densidade do aço estrutural é normalmente considerada aproximadamente constante em análises correntes. A NBR 14323 e a norma europeia EN 1993-1-2 indicam densidade de aproximadamente $7.850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à temperatura ambiente e pequenas reduções com a temperatura ocasionadas pela expansão térmica, da mesma forma em que a norma permite tratamento simplificado mantendo a densidade constante para diversas aplicações. Para análises

em condição de incêndio avançadas pode-se utilizar uma tabela temperatura-dependente para massa específica quando se deseja maior precisão. Justamente para melhor concisão, foram utilizados no software os dados elencados na [Tabela 51](#).

Tabela 54 - Relação de densidade e temperatura do aço.

Temperatura (°C)	Densidade ρ (kg/m ³)
20	7850
100	7840
200	7830
400	7790
600	7730
800	7650
1000	7550

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2:2004 e NBR 14323.

4.2.2.7 Incremento e solução de análise térmica

Para a simulação térmica, foi configurado no modo *Heat Transfer*, que permite o processamento de uma análise transiente de calor. Esse tipo de análise considera a variação temporal da temperatura em cada ponto do modelo, permitindo avaliar como o calor se propaga e se distribui ao longo do tempo, em contraste com as análises estacionárias, nas quais o regime térmico é assumido como constante. Assim, a análise transiente possibilita representar com maior realismo o comportamento térmico do material sob condições de aquecimento ou resfriamento progressivo.

O incremento de tempo adotado foi de 3600 segundos, equivalente a 60 minutos, de modo a assegurar uma discretização temporal adequada e estável para o fenômeno estudado. O parâmetro de tamanho de incremento foi definido como 1, garantindo que cada incremento represente exatamente um segundo de simulação, o que facilita a comparação direta com dados experimentais ou prescrições normativas.

A solução numérica foi conduzida pelo método Full Newton, caracterizado por reavaliar completamente a matriz de rigidez térmica a cada iteração. Esse procedimento confere maior precisão e robustez ao processo de convergência, sendo particularmente eficaz em situações com não linearidades térmicas, como variação de propriedades do material em função da temperatura ou trocas de calor complexas.

4.2.2.8 Condições de contorno e interações do modelo térmico

No modelo térmico, é necessária apenas a configuração da interação entre a madeira e o elemento de aço embutido, uma vez que essa interface representa a principal via de condução de calor entre materiais de diferentes condutividades. A [Tabela 52](#) apresenta detalhadamente os parâmetros que serão adotados para essa configuração.

Tabela 55 - Interação entre o aço e a madeira no modelo térmico.

Tipo de Interação	Descrição	Configuração
<i>Embedded</i>	Interação embutida entre a viga e as barras de aço	Compatibilização dos deslocamentos internos

Fonte: Próprio Autor (2025).

A interação entre os materiais é complementada pela configuração da condição de contorno *Surface Film Condition*, que representa a troca de calor por convecção entre a superfície do elemento e o meio ambiente. Essa definição é essencial para reproduzir de forma realista o comportamento térmico do sistema, uma vez que, além da condução interna de calor entre a madeira e o aço embutido, ocorre também a dissipação térmica para o entorno.

A interação foi definida no modo *Embedded Coefficient*, o que permite o acoplamento direto da transferência de calor convectiva entre os corpos em contato. O campo *film coefficient* foi estabelecido em $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, valor comumente adotado para trocas de calor por convecção natural em análises térmicas estruturais. Para o parâmetro *Film Coefficient* definiu-se como *Instantaneous*, indicando que a transferência de calor é atualizada a cada incremento temporal, refletindo a variação dinâmica do campo térmico.

A definição *sink definition* foi configurada como *Uniform*, assumindo uma temperatura homogênea no meio circundante. Já a temperatura de referência *sink temperature* foi fixada em 1 °C, valor inicial de equilíbrio térmico antes do início da elevação de temperatura imposta pela curva de incêndio. Não obstante, a amplitude térmica associada ao *sink amplitude* foi vinculada a uma tabela anexada ([Tabela 53](#)) que expressa a curva padrão de incêndio da norma ISO-834, que descreve a evolução temporal da temperatura ambiente durante a exposição ao fogo.

Adicionalmente, foi configurada a interação *Surface Radiation*, responsável pela representação da troca de calor por radiação térmica entre a superfície do modelo e o meio ambiente. Essa condição de contorno é fundamental em análises de exposição ao fogo, pois em altas temperaturas a radiação se torna um dos principais mecanismos de transferência de calor, atuando de forma complementar à condução e à convecção.

Tabela 56 - Curva padrão de incêndio ISO-834

Temperatura (°C)	Amplitude (minutos)
25	0
581,41	5
683,43	10
743,56	15
786,35	20
846,80	30
889,74	40
923,08	50
950,34	60
973,39	70
993,37	80
1010,99	90
1026,75	100
1041,02	110
1054,04	120
1066,02	130
1077,11	140
1087,44	150
1097,10	160
1106,18	170
1114,74	180
1122,83	190
1130,52	200
1137,82	210
1144,79	220
1151,44	230
1157,82	240
1163,93	250
1169,80	260
1175,46	270
1180,90	280
1186,16	290
1191,24	300

Fonte: Adaptado de ISO-834.

A configuração foi definida com o tipo de radiação *To Ambient*, indicando que a troca de calor ocorre entre a superfície do modelo e o ambiente circundante, considerado como uma fonte de radiação uniforme. A distribuição da emissividade foi especificada como *Uniform*, atribuindo um valor constante de 0,8 para toda a superfície exposta. Esse valor representa uma emissividade típica de materiais lignocelulósicos e metálicos com acabamento oxidado.

A temperatura ambiente de referência (*ambient temperature*) definiu-se em 1 °C, representando o estado inicial da análise antes do início do aquecimento. A amplitude térmica associada à temperatura ambiente (*ambient temperature amplitude*) foi vinculada à tabela da norma ISO 834, que descreve a evolução da curva-padrão de incêndio em função do tempo.

Dessa forma, o modelo ajusta automaticamente o gradiente radiativo conforme a elevação da temperatura ambiente prevista pela norma.

Essas configurações garantiram uma representação realista e fisicamente consistente da transferência de calor por radiação, permitindo que o modelo térmico capturasse adequadamente os efeitos combinados de convecção e radiação durante o aquecimento transiente do sistema híbrido.

A [Tabela 54](#) apresenta de forma resumida os parâmetros que foram empregados nas condições de contorno do modelo térmico e consolidada as configurações adotadas no software para as interações de convecção e radiação. Essa organização objetiva fornecer uma visão sintética e padronizada dos principais dados de entrada que se utilizou na simulação, facilitando a reprodutibilidade do modelo e a verificação dos critérios adotados para o intercâmbio térmico entre o sistema e o ambiente externo.

Tabela 57 - Tabela resumitiva das condições de contorno para simulações térmicas.

Tipo de interação	Parâmetro	Configuração adotada	Descrição técnica
<i>Surface Film Condition</i>	<i>Definition</i>	<i>Embedded Coefficient</i>	Representa a troca de calor por convecção entre a superfície do modelo (madeira e aço embutido) e o meio ambiente.
	<i>Film Coefficient</i>	25 W/m ² ·K	Valor típico para convecção natural em análises térmicas estruturais.
	<i>Film Coefficient (variação)</i>	<i>Instantaneous</i>	Atualiza o coeficiente a cada incremento temporal, acompanhando a evolução térmica.
	<i>Sink Definition</i>	<i>Uniform</i>	Define o meio ambiente com temperatura homogênea.
	<i>Sink Temperature</i>	1 °C	Temperatura inicial do ambiente antes da exposição ao fogo.
	<i>Sink Amplitude</i>	Tabela conforme ISO 834	Define a variação temporal da temperatura ambiente segundo a curva-padrão de incêndio.
<i>Surface Radiation</i>	<i>Radiation Type</i>	<i>To Ambient</i>	Considera a radiação emitida da superfície do modelo para o ambiente.
	<i>Emissivity Distribution</i>	<i>Uniform</i>	Assume emissividade constante sobre toda a superfície exposta.
	<i>Emissivity</i>	0,8	Valor médio típico para superfícies de madeira e aço oxidado.
	<i>Ambient Temperature</i>	1 °C	Temperatura inicial do ambiente.
	<i>Ambient Temperature Amplitude</i>	Tabela conforme ISO 834	Define o aumento da temperatura ambiente ao longo do tempo conforme a curva padrão de incêndio.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Na etapa de definição das condições de contorno da camada *Load*, foi configurado o *Boundary Condition Manager* com o tipo *Temperature*, destinado à aplicação direta da variação térmica sobre a superfície exposta ao fogo. A região de aplicação definiu-se como *Burn Surface*, correspondente à área sujeita à ação térmica incidente (faces laterais e inferior). A distribuição adotada foi *Uniform*, de modo que toda a superfície exposta ao incêndio receba a mesma intensidade de aquecimento ao longo do tempo. A magnitude inicial foi estabelecida em 1 °C, representando o estado térmico de equilíbrio antes do início do aquecimento. Por fim, a amplitude térmica fora vinculada à tabela de variação de temperatura ([Tabela 53](#)) conforme a norma ISO 834.

4.2.2.9 Discretização e elementos finitos para análise térmica

De forma análoga ao procedimento adotado na análise mecânica, a malha de elementos finitos será refinada até atingir um tamanho médio de 20 mm, de modo a garantir um equilíbrio adequado entre precisão dos resultados numéricos e eficiência computacional. Essa discretização permitirá capturar com fidelidade os gradientes térmicos significativos ao longo da seção transversal, especialmente nas regiões próximas às interfaces entre materiais, sem elevar excessivamente o custo de processamento.

Os elementos finitos utilizados foram do tipo linear, pertencentes à família *Heat Transfer*, apropriada para análises térmicas transientes que serão processadas. Para a modelagem do volume de madeira, empregou-se o elemento DC3D8, um elemento hexaédrico tridimensional de oito nós e formulação linear, amplamente utilizado em simulações de condução de calor em sólidos homogêneos. Esse tipo de elemento apresenta boa estabilidade numérica e desempenho adequado para problemas de transferência térmica com geometrias regulares.

No caso das barras de aço embutidas, são utilizados elementos também de geometria linear da mesma família *Heat Transfer*, sob a designação DC1D2, correspondente a um elemento unidimensional de dois nós, ideal para representar condutores embutidos ou regiões alongadas com comportamento predominantemente uniaxial. Essa escolha possibilitou a adequada representação da condução térmica ao longo do comprimento das barras, assegurando a compatibilidade térmica e topológica entre os diferentes domínios do modelo. A [Tabela 55](#) traz as configurações dos tipos de malha utilizados para a madeira e para o aço na análise térmica.

Tabela 58 - Discretização do modelos finitos para análise térmica.

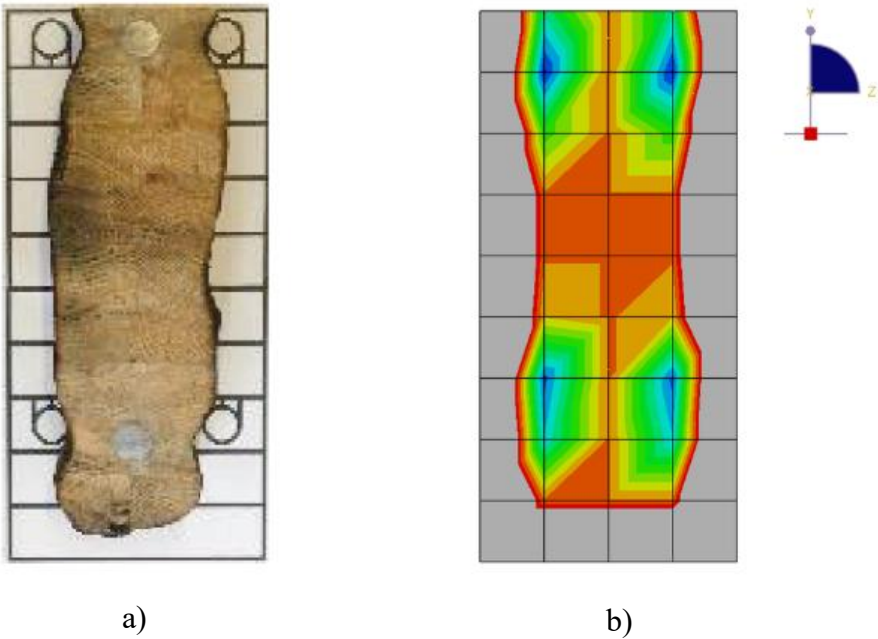
Componente	Tipo de elemento	Descrição
Viga de madeira	DC3D8	Elementos sólidos hexaédricos tridimensionais de oito nós, com formulação linear, pertencentes à família <i>Heat Transfer</i> , adequados para simulação de condução térmica em sólidos.
Barras de aço embutidas	DC1D2	Elementos unidimensionais lineares de dois nós, pertencentes à família <i>Heat Transfer</i> , utilizados para representar a condução térmica ao longo de barras ou condutores embutidos.

Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2.2.10 Resultados da validação em altas temperaturas

Os resultados numéricos obtidos por meio de simulações térmicas transientes utilizando o método dos elementos finitos, com propriedades térmicas dependentes da temperatura e condições de contorno compatíveis com as prescrições normativas para exposição ao fogo-padrão. A modelagem considerou explicitamente a redução progressiva da seção resistente em função do avanço da carbonização, permitindo a identificação da fronteira entre a madeira intacta e a região carbonizada ao longo do tempo de exposição. Os resultados da progressão da degradação do modelo numérico em comparação com a seção II-VI da viga experimental são apresentados na [Figura 71](#).

Figura 71- Comparativo do resultado entre o modelo experimental e o modelo numérico em altas temperaturas.



Fonte: a) Adaptado de Matsushita e Shyoia (2023b); b) Próprio Autor (2026)

A análise comparativa evidencia uma convergência significativa entre os resultados numéricos e os dados experimentais da literatura no que se refere à geometria da seção residual após 60 minutos de exposição ao fogo. Observa-se que a forma geral da fronteira de carbonização obtida numericamente reproduz adequadamente o comportamento experimental, caracterizado por um avanço mais pronunciado nas regiões expostas diretamente às faces laterais e inferior do elemento, bem como por variações locais associadas à anisotropia térmica da madeira. Essa concordância geométrica indica que o modelo numérico é capaz de representar, de forma satisfatória, os mecanismos dominantes de transferência de calor e degradação térmica do material.

Além da compatibilidade geométrica, destaca-se a proximidade entre as taxas médias de carbonização representadas pelo modelo numérico em relação ao estudo experimental. A profundidade da camada carbonizada após 60 minutos de exposição apresenta valores coerentes com os resultados experimentais, situando-se dentro da faixa de variação esperada para madeiras de coníferas submetidas a incêndio-padrão. Tal convergência reforça a adequação das propriedades térmicas adotadas no modelo, bem como das hipóteses simplificadoras inerentes à simulação, como a consideração de um critério térmico para definição da fronteira de carbonização.

Outro aspecto relevante para a validação do modelo refere-se à evolução temporal do campo de temperaturas no interior da seção transversal. Os resultados numéricos demonstram gradientes térmicos compatíveis com aqueles observados experimentalmente, com elevação rápida da temperatura nas regiões superficiais e atraso significativo no aquecimento do núcleo da seção. Esse comportamento é consistente com a baixa condutividade térmica da madeira e com o efeito isolante da camada carbonizada, amplamente documentado na literatura. A correta reprodução desse fenômeno é essencial para análises estruturais subsequentes, uma vez que a resistência residual do elemento está diretamente associada à extensão da região não carbonizada.

A convergência observada entre os resultados numéricos e experimentais também valida, de forma indireta, a adoção das recomendações normativas para a modelagem da exposição ao fogo. As simulações realizadas com base nas prescrições da norma EN 1995-1-2:2004 demonstram boa aderência aos resultados experimentais, indicando que o emprego dessas normas como base para análises numéricas em contexto acadêmico é tecnicamente justificável. Ressalta-se, contudo, que o modelo numérico permite uma descrição mais detalhada da evolução da seção residual quando comparado aos métodos simplificados normativos, o que constitui uma vantagem significativa para estudos aprofundados.

Do ponto de vista metodológico, a validação apresentada não se restringe à comparação pontual de valores, mas fundamenta-se na análise qualitativa e quantitativa do comportamento global do sistema. A similaridade entre os contornos de carbonização, as profundidades médias da camada carbonizada e os gradientes térmicos internos demonstra que o modelo numérico captura adequadamente os principais fenômenos físicos envolvidos na exposição ao fogo. Essa abordagem fortalece a robustez da validação, reduzindo a dependência de ajustes empíricos específicos e ampliando a aplicabilidade do modelo para diferentes geometrias e condições de carregamento térmico.

Dessa forma, pode-se afirmar que a convergência entre os resultados numéricos apresentados e os dados experimentais do artigo de referência constitui uma evidência consistente da validade do modelo adotado para análises em altas temperaturas. Essa validação fornece respaldo técnico para a utilização do modelo em estudos paramétricos e em avaliações do desempenho de elementos estruturais de madeira, com ou sem reforços, sob ação do fogo. Consequentemente, os resultados obtidos ao longo desta dissertação podem ser interpretados com maior grau de confiabilidade, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de engenharia de estruturas em situação de incêndio.

4.2.3 Análises termomecânicas acopladas

4.2.3.1 Atributos iniciais do modelo termomecânico acoplado

O modelo termomecânico acoplado adotado manteve integralmente os atributos e parâmetros definidos no modelo térmico, conforme apresentado no item 4.2.2.4, assegurando a consistência física e numérica da formulação. Nesse contexto, foram preservadas as referências termodinâmicas fundamentais, incluindo a definição da temperatura do zero absoluto a $-273,15^{\circ}\text{C}$ (0 K), essencial para a correta interpretação das propriedades dependentes da temperatura e para a coerência dos cálculos de energia interna e fluxo térmico em escala absoluta. Adicionalmente, foi mantida a constante de Stefan–Boltzmann, adotada com valor de $5,669 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$, permitindo a adequada consideração dos efeitos de radiação térmica, os quais se tornam predominantes em cenários de exposição ao incêndio. Dessa forma, o modelo acoplado contempla de maneira integrada os mecanismos de condução, convecção e radiação, garantindo uma representação realista do balanço térmico e de seus efeitos na resposta mecânica da viga ao longo do aquecimento.

4.2.3.2 Propriedades dos materiais

Para a realização das 168 simulações termomecânicas acopladas, unificou-se as abordagens utilizadas nos itens 4.2.1 e 4.2.2, ajustando-se apenas as propriedades térmicas para a madeira de *Pinus sp.* Ainda em relação às propriedades da madeira, importante ressaltar que fora considerada a expansão da madeira durante as simulações, conforme a [Tabela 56](#).

Tabela 59 - Coeficientes de expansão térmica ortotrópica da madeira de *Pinus sp.*

Temperatura (°C)	α_{11} (1/°C)	α_{22} (1/°C)	α_{33} (1/°C)
20	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
100	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
200	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
300	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
400	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
500	$4,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de Goli *et al.* (2019).

A densidade inicial da madeira de *Pinus sp.* foi adotada como 550 kg/m³. A variação desse parâmetro em função da exposição ao incêndio padrão ISO-834 foi determinada com base no ábaco apresentado na [Figura 70](#), o qual permite estimar a degradação da densidade da madeira em função da temperatura. Os valores obtidos a partir dessa metodologia encontram-se na [Tabela 57](#).

Tabela 60 - Variação da densidade da madeira de *Pinus sp.* em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Densidade (kg/m ³)
20	550,0
98	549,45
99	548,90
120	547,25
200	544,50
250	511,50
300	418,00
350	286,00
400	209,00
600	154,00
800	143,00
1200	0,55

Fonte: Próprio Autor (2026).

As demais configurações adotadas nas simulações seguiram os parâmetros previamente descritos nos subitens deste trabalho. Com o objetivo de facilitar a compreensão e a consulta das informações utilizadas nas simulações numéricas, a [Tabela 58](#) apresenta as nomenclaturas empregadas, bem como a indicação dos respectivos locais em que os dados podem ser encontrados ao longo deste trabalho.

Tabela 61 - Localização das propriedades dos materiais para *input* no software.

Configuração	Local
Madeira - Propriedades constitutivas	Tabela 35
Madeira - Coeficientes de ponderação (Hill)	Tabela 37
Madeira - Condutividade térmica	Tabela 46
Madeira - Calor específico	Tabela 47
Madeira - Variação de densidade	Tabela 48
Aço - Propriedades mecânicas	Tabela 38
Aço - Condutividade térmica	Tabela 49
Aço - Madeira - Calor específico	Tabela 50
Aço - Variação de densidade	Tabela 51

Fonte: Próprio Autor (2026).

4.2.3.3 Configuração do *Step*

Fora utilizado o procedimento *Coupled temperature–displacement* em regime transiente, de modo a permitir a consideração simultânea da evolução do campo térmico e da resposta mecânica da estrutura ao longo do tempo. O tempo total de análise foi estabelecido em 60 minutos, compatível com a aplicação do incêndio padrão ISO-834, possibilitando a avaliação da degradação progressiva das propriedades do material e de seus efeitos estruturais.

No que se refere ao controle incremental, adotou-se um esquema de incrementação automática, com incremento inicial de 0,1, valor mínimo de 1×10^{-5} e valor máximo de 1,0, sendo conduzido o número máximo de incrementos a necessidade de cada modelo até atingimento da tensão última. Adicionalmente, foi imposto um limite máximo de variação de temperatura de 5 °C por incremento, com o objetivo de garantir a estabilidade numérica e a adequada captura dos gradientes térmicos, especialmente nas fases iniciais de aquecimento, nas quais ocorrem variações térmicas mais acentuadas.

Quanto à estratégia de solução, foi empregado o método Full Newton, associado ao armazenamento de matriz assimétrico, configuração recomendada para problemas fortemente não lineares, como aqueles envolvendo acoplamento termomecânico, degradação de

propriedades e grandes variações de rigidez. Essa escolha contribui para maior robustez e convergência do processo iterativo ao longo da análise.

As cargas térmicas e mecânicas foram aplicadas de forma instantânea no início de cada incremento, sendo a extrapolação do estado anterior realizada de maneira linear, estratégia que favorece a continuidade da solução e a eficiência computacional. Não foram considerados efeitos adicionais de fluência, retração ou comportamento viscoelástico, uma vez que o foco do estudo esteve centrado na resposta termomecânica da madeira sob condições de incêndio.

4.2.3.4 Interações do modelo termomecânico acoplado

No modelo termomecânico acoplado, as interações entre as partes foram mantidas de forma consistente com aquelas previamente definidas nos modelos térmico e mecânico, assegurando a continuidade física e numérica da formulação. As configurações adotadas seguem as condições descritas na [Tabela 41](#), que reúne as principais interações estruturais utilizadas na modelagem.

Conforme apresentado, a interação do tipo *Coupling* foi empregada para o acoplamento entre a carga aplicada e a placa, por meio de um ponto de referência (*reference point – RP*), permitindo o controle cinemático do carregamento e a correta transferência dos esforços para o sistema estrutural. A interação *Tie* foi utilizada para promover a vinculação entre a placa, definida como superfície escrava, e a viga, definida como superfície mestra, assegurando a transferência integral de deslocamentos, deformações e tensões, sem a ocorrência de deslizamentos relativos. Já a interação *Embedded* foi adotada para representar o embutimento das barras de aço no interior da viga de madeira, garantindo a compatibilização dos deslocamentos internos e a atuação conjunta dos materiais no comportamento estrutural.

No âmbito térmico, o modelo acoplado preserva as condições de contorno previamente estabelecidas, destacando-se a interação *Surface Film Condition*, responsável pela representação da troca de calor por convecção entre as superfícies expostas e o meio ambiente. Essa interação foi definida no modo *Embedded Coefficient*, possibilitando o acoplamento direto da transferência convectiva de calor entre os corpos em contato. O coeficiente de película (*film coefficient*) foi fixado em $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, valor usualmente adotado para convecção natural em análises termoestruturais, sendo considerado no modo *Instantaneous*, de forma que a transferência térmica é atualizada a cada incremento temporal.

A definição do meio circundante (*sink definition*) foi estabelecida como *Uniform*, assumindo uma temperatura homogênea do ambiente, com temperatura inicial (*sink*

temperature) fixada em 1 °C, correspondente à condição de equilíbrio térmico antes do início do aquecimento. A evolução temporal da temperatura ambiente foi imposta por meio da amplitude térmica associada à curva-padrão de incêndio da norma ISO-834, conforme apresentado na [Tabela 53](#).

Adicionalmente, foi considerada a interação *Surface Radiation*, responsável pela modelagem da troca de calor por radiação térmica entre a superfície do modelo e o ambiente. Essa condição foi configurada com o tipo *To Ambient*, admitindo um meio radiativo uniforme, e com emissividade uniforme igual a 0,8, valor representativo para superfícies de madeira e aço em condições de exposição ao fogo. A temperatura ambiente de referência foi igualmente definida como 1 °C, com a respectiva amplitude vinculada à curva ISO-834, assegurando a correta representação dos mecanismos combinados de condução, convecção e radiação no modelo termomecânico acoplado.

4.2.3.5 Condições de contorno (módulo *Load*)

Com o objetivo de reduzir o custo computacional e otimizar o tempo de processamento das simulações numéricas, foi modelada apenas metade do comprimento das vigas, explorando a simetria geométrica e de carregamento do problema. Para tal, o software permitiu a imposição de uma condição de contorno de simetria (*symmetry*), definida no sistema de coordenadas global (*CSYS global*) do modelo, adotando-se a configuração XSYMM, na qual são anulados o deslocamento normal ao plano de simetria ($U1 = 0$) e as rotações em torno dos eixos perpendiculares a esse plano ($UR2 = 0$ e $UR3 = 0$). Essa abordagem assegura que o comportamento da metade modelada seja representativo da viga completa, preservando a coerência física da resposta estrutural e térmica.

No que se refere à aplicação do carregamento mecânico, adotou-se o método de deslocamento prescrito (*displacement/rotation*), impondo-se um deslocamento vertical de 70 mm no ponto de referência associado à chapa do atuador. Essa estratégia permite maior estabilidade numérica em análises não lineares, especialmente em situações que envolvem degradação progressiva das propriedades mecânicas em função da temperatura, garantindo o controle do caminho de carregamento ao longo da simulação.

As condições de apoio foram definidas de modo a reproduzir adequadamente o comportamento estrutural da viga, sendo restringidos os deslocamentos nas direções x, y e z, bem como as rotações em torno dos eixos x e y, assegurando a estabilidade global do modelo e

impedindo movimentos rígidos indesejados, sem comprometer a liberdade de deformação compatível com o esquema estrutural analisado.

Para a imposição da condição de contorno térmica, foi aplicada uma distribuição uniforme de temperatura, com magnitude inicial unitária, associada à amplitude térmica definida pela curva-padrão de incêndio ISO-834. Essa configuração possibilita a correta reprodução da evolução temporal da temperatura ambiente durante a exposição ao fogo, assegurando que o aquecimento imposto ao modelo siga rigorosamente a prescrição normativa e permitindo a avaliação consistente dos efeitos térmicos e termomecânicos ao longo do tempo.

Por fim, foi definido um campo térmico ambiente por meio da ferramenta *Predefined Field*, selecionando-se o tipo *Field*, com distribuição por especificação direta (*direct specification*). O campo foi associado à variável de campo número 1 (*field variable number: 1*), sendo considerada uma variação constante ao longo da região (*section variation: constant through region*), de modo a garantir a homogeneidade do campo térmico aplicado em todo o domínio analisado. A magnitude adotada foi de 25 °C, valor compatível com a condição térmica de referência do ambiente, enquanto a amplitude *Instantaneous* foi utilizada para assegurar que o campo fosse atualizado de forma imediata a cada incremento temporal. Essa configuração possibilita a correta inicialização e controle do estado térmico do modelo, contribuindo para a estabilidade numérica da análise e para a coerência da resposta termomecânica ao longo do processo de aquecimento.

4.2.3.6 Discretização e elementos finitos para análise termomecânica acoplada

Nas análises termomecânicas acopladas desenvolvidas por meio do Método dos Elementos Finitos, a estratégia de discretização espacial seguiu os mesmos princípios adotados na modelagem mecânica, sendo a malha ajustada até atingir um tamanho característico médio de 20 mm. Tal escolha visou assegurar a adequada representação dos fenômenos físicos envolvidos, especialmente a evolução dos campos térmicos no interior da seção transversal da viga, ao mesmo tempo em que se manteve o esforço computacional em níveis compatíveis com a complexidade do problema. Esse refinamento mostrou-se particularmente relevante nas regiões de transição entre materiais distintos, onde os gradientes de temperatura tendem a ser mais intensos.

A formulação térmica empregada no modelo acoplado baseou-se na utilização de elementos finitos de ordem linear pertencentes ao conjunto *Coupled Temperature-Displacement*, os quais são apropriados para a resolução de problemas térmicos transientes integrados à

resposta estrutural. Os domínios correspondentes à madeira e a chapa do atuador foram discretizados utilizando-se o elemento C3D8T, um elemento sólido tridimensional hexaédrico de oito nós, com formulação acoplada temperatura–deslocamento, amplamente empregado em análises termomecânicas transientes. Esse tipo de elemento permite a solução simultânea dos campos térmico e mecânico, apresentando bom desempenho numérico e robustez na representação do comportamento termomecânico da madeira submetida a variações significativas de temperatura.

As barras de aço inseridas no interior da viga foram modeladas por meio do elemento T3D2T, caracterizado como um elemento unidimensional linear de dois nós, pertencente à família *Coupled Temperature–Displacement*, apropriado para análises termomecânicas acopladas. Esse tipo de elemento possibilita a solução simultânea dos campos térmico e mecânico ao longo de geometrias predominantemente lineares, permitindo a representação eficiente da transferência de calor e da resposta mecânica ao longo do comprimento das barras de aço. Dessa forma, assegura-se a compatibilidade termomecânica entre os diferentes domínios do modelo, bem como a adequada integração do comportamento do aço no sistema estrutural analisado.

4.2.3.7 Decorrências das simulações termomecânicas acopladas

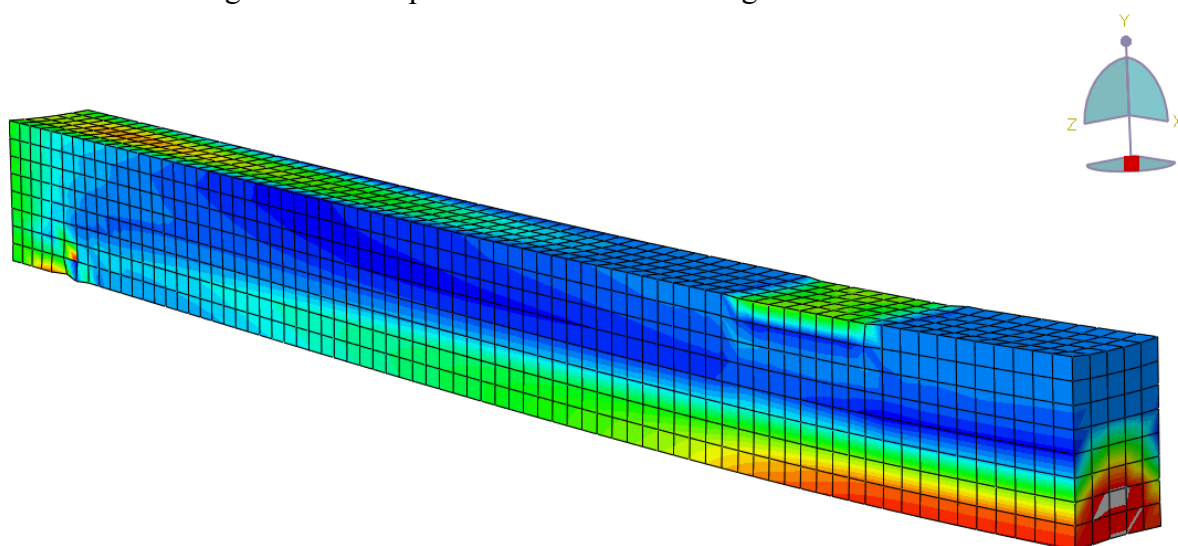
As análises termomecânicas acopladas realizadas no presente estudo permitiram avaliar, de forma integrada, os efeitos da elevação de temperatura sobre o comportamento mecânico do elemento estrutural de madeira com reforço interno de aço. A partir dessas simulações, tornou-se possível extrair campos de tensões, deformações e temperaturas ao longo do tempo, possibilitando a identificação dos mecanismos que conduzem à perda de capacidade resistente e, conseqüentemente, à ruptura do elemento.

A extração e a análise dos resultados foram conduzidas por meio do módulo *Visualization* do software Abaqus/Standard. Inicialmente, no módulo *Visualization*, foi selecionado o arquivo de resultados (.odb) correspondente à simulação termomecânica acoplada. Em seguida, definiu-se o campo de saída primário (*Field Output*) como o tensor de tensões (S), sendo adotada a componente S11, correspondente à tensão normal longitudinal do elemento, alinhada com o eixo principal da viga (Figura 72).

Essa componente foi escolhida por representar diretamente as tensões de tração e compressão associadas ao comportamento fletor do elemento estrutural, sendo, portanto, a grandeza mais relevante para a avaliação do estado limite último à flexão.

Para permitir uma análise direta entre as tensões atuantes e a resistência última do material, procedeu-se à limitação intencional da escala de cores do campo de tensões. No menu *Contour Plot Options*, aba *Limits*, foi adotado um valor máximo específico (*Specify*) igual a 40,4 MPa, correspondente à tensão última da madeira considerada no modelo.

Figura 72 - Campo de tensões normais longitudinais atuantes.



Fonte: Próprio Autor (2026).

Essa escolha metodológica possibilita que as regiões do elemento estrutural submetidas a tensões próximas ou superiores à resistência última sejam imediatamente identificadas no pós-processamento, destacando zonas críticas de comportamento estrutural. Valores superiores ao limite imposto são automaticamente saturados na escala de cores, indicando a ocorrência de estados tensionais incompatíveis com a capacidade resistente do material.

O valor mínimo da escala foi mantido como *auto-compute*, permitindo a visualização completa das regiões submetidas a compressão, sem comprometer a interpretação dos estados críticos de tração.

Com os limites de visualização definidos, analisou-se a distribuição espacial do campo de tensões ao longo do elemento estrutural, observando-se a concentração de tensões máximas nas regiões de maior momento fletor, especialmente nas fibras extremas da seção transversal.

A análise foi realizada para o incremento de tempo correspondente a 60 minutos de exposição ao incêndio, conforme indicado no *Step Time* do Abaqus. Esse procedimento foi repetido para diferentes instantes da simulação, permitindo avaliar o desenvolvimento progressivo das tensões em função do aumento da temperatura e da degradação das propriedades mecânicas dos materiais.

A comparação entre o campo de tensões longitudinais e o valor da tensão última da madeira permitiu identificar o instante em que o elemento estrutural atinge a condição de esgotamento resistente. Observou-se que, à medida que a temperatura se eleva, ocorre uma redistribuição das tensões internas, associada à redução da rigidez e da resistência dos materiais, especialmente nas regiões mais expostas ao fluxo térmico.

Esse procedimento de extração e análise constitui a base para a determinação do tempo de ruptura dos modelos analisados, bem como para a validação da formulação analítica proposta, ao relacionar diretamente os resultados numéricos com critérios resistentes fisicamente fundamentados.

Após a análise do campo de tensões longitudinais, procedeu-se à extração do campo de temperaturas no módulo *Visualization*, selecionando-se como saída primária (*Field Output*) a variável TEMP, correspondente à temperatura nodal do modelo. Essa etapa é fundamental para a compreensão dos mecanismos termofísicos associados à degradação da seção resistente de madeira em situação de incêndio.

De modo análogo à análise mecânica, foi realizada a limitação intencional da escala de cores do campo térmico por meio do menu *Contour Plot Options*, aba *Limits*. Nesse caso, foi especificado um valor máximo de 300 °C, adotado como temperatura de referência para o início do processo de carbonização da madeira, conforme amplamente reportado na literatura técnica.

A definição desse limite permite identificar, de forma direta e visual, as regiões do elemento estrutural que atingem ou ultrapassam a temperatura crítica associada à formação da camada carbonizada, a qual apresenta resistência mecânica desprezível quando comparada à madeira não degradada.

A partir da visualização do campo de temperaturas, observa-se a formação de gradientes térmicos pronunciados a partir das superfícies expostas ao incêndio em direção ao núcleo do elemento (Figura 73). As regiões externas da viga atingem rapidamente temperaturas superiores a 300 °C, configurando a chamada frente de carbonização, enquanto as regiões internas permanecem a temperaturas significativamente inferiores.

Esse comportamento evidencia a progressiva redução da seção resistente efetiva da viga ao longo do tempo, uma vez que a camada carbonizada deixa de contribuir para a capacidade mecânica do elemento. Assim, o avanço da frente de carbonização pode ser interpretado como uma perda geométrica equivalente, que altera simultaneamente a rigidez à flexão e a distribuição interna de tensões.

No contexto das análises termomecânicas acopladas, esse efeito é capturado de forma implícita pelo modelo numérico, uma vez que o campo térmico influencia diretamente a

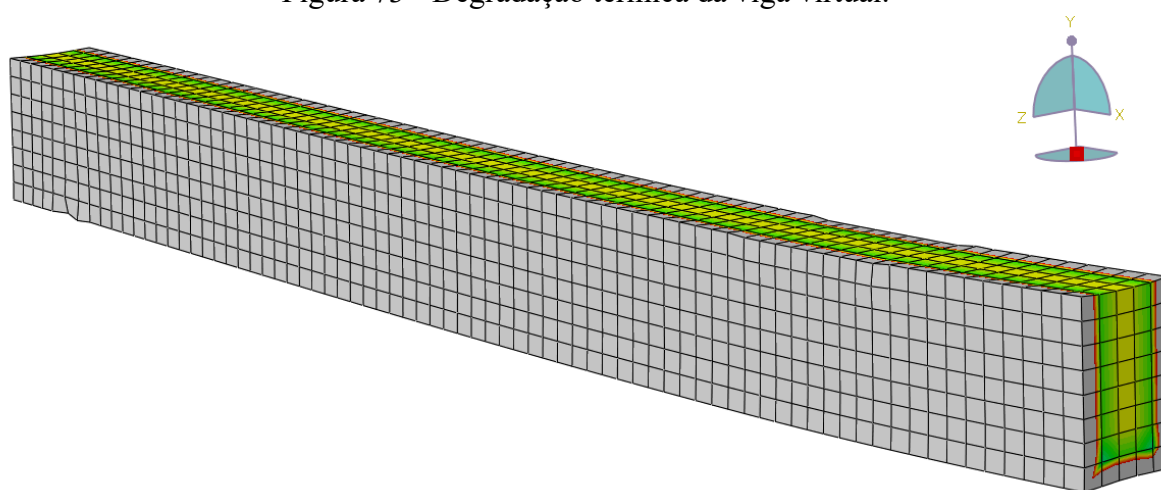
degradação das propriedades mecânicas da madeira e do aço, bem como a redistribuição das tensões internas.

A análise conjunta dos campos de temperatura e tensão evidencia que a ruptura do elemento não decorre exclusivamente do aumento das tensões atuantes, mas da combinação entre:

- a. a redução progressiva da seção resistente devido à carbonização da madeira;
- b. a degradação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura;
- c. e a consequente concentração de tensões nas regiões remanescentes da seção transversal.

Dessa forma, o procedimento adotado no pós-processamento permite estabelecer uma correlação direta entre o avanço da carbonização, observado no campo térmico, e o instante em que as tensões longitudinais atingem a resistência última do material, fornecendo um critério físico e coerente para a determinação do tempo de ruptura do elemento estrutural em situação de incêndio.

Figura 73 - Degradação térmica da viga virtual.



Fonte: Próprio Autor (2026).

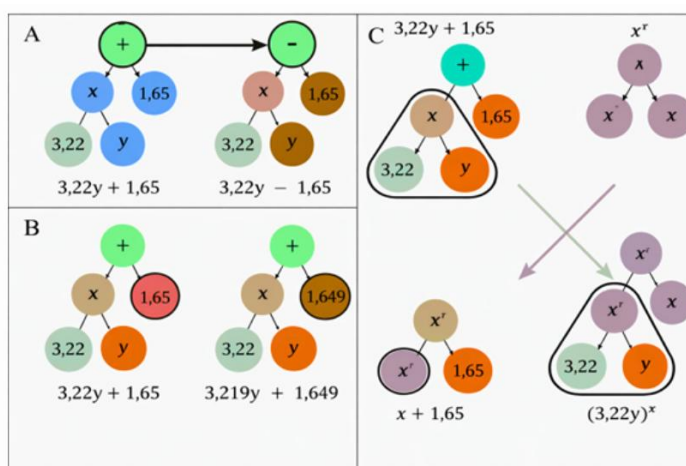
4.2.4 Modelo de regressão simbólica

A modelagem preditiva do tempo de resistência ao fogo foi conduzida por meio de regressão simbólica, adotada como ferramenta de aprendizado de máquina orientada à obtenção de expressões analíticas a partir de dados, preservando interpretabilidade física e potencial de generalização. Diferentemente de métodos tradicionais de regressão, essa abordagem não pressupõe forma funcional pré-definida, buscando simultaneamente a estrutura matemática e

os parâmetros da equação que melhor descrevem o fenômeno investigado (Angelis, Sofos e Karakasidis, 2023).

O procedimento de regressão simbólica é fundamentado em técnicas computacionais de busca e otimização, nas quais expressões matemáticas são representadas por estruturas hierárquicas formadas pela combinação de operadores aritméticos e funções matemáticas elementares (Figura 74). A partir de um conjunto inicial de expressões candidatas, são aplicados operadores sistemáticos de modificação e recombinação, com o objetivo de aprimorar progressivamente o desempenho dos modelos em relação aos dados disponíveis, conduzindo à identificação de equações com maior capacidade de representação do fenômeno analisado.

Figura 74 - Conceitos: A - Modificação; B - Otimização de constantes; C - Recombinação.



Fonte: Adaptado de Santos Silva (2025).

A qualidade das expressões geradas é avaliada por métricas estatísticas, como o erro médio ou o coeficiente de determinação, além de critérios de complexidade, de modo a evitar modelos excessivamente elaborados e de difícil interpretação. Assim, a regressão simbólica busca um equilíbrio entre precisão preditiva e simplicidade matemática, favorecendo equações compactas e fisicamente interpretáveis.

No contexto deste trabalho, a regressão simbólica é empregada como uma ferramenta para extrair equações explícitas a partir de um conjunto de resultados obtidos por simulações paramétricas. Essa abordagem empírica permite condensar o comportamento estrutural analisado em uma formulação analítica direta, reduzindo a dependência de procedimentos computacionais complexos e viabilizando sua aplicação prática em etapas preliminares de projeto estrutural.

Em estudos de modelagem matemática aplicados a análises termomecânicas acopladas, as variáveis do problema são classificadas conforme sua função no modelo. As variáveis independentes correspondem aos parâmetros de entrada, definidos previamente e controlados ao longo das simulações, enquanto a variável dependente representa a resposta do sistema estrutural, resultante da interação entre os campos térmico e mecânico considerados.

No âmbito desta dissertação, as variáveis independentes estão associadas às características geométricas do elemento analisado, bem como à presença e à disposição dos elementos de reforço metálico. Dentre essas variáveis, incluem-se as dimensões geométricas do elemento estrutural (Altura, largura e comprimento), as propriedades geométricas das barras de aço incorporadas ao modelo (área de aço) e a posição dessas barras no interior da seção transversal (posição geométrica). Esses parâmetros influenciam diretamente a transferência de calor, a redistribuição de tensões e a evolução dos danos ao longo do tempo, sendo sistematicamente variados nas análises numéricas realizadas.

A variável dependente adotada neste estudo é o tempo até a ruptura do elemento estrutural, determinado a partir das análises termomecânicas acopladas. Esse tempo corresponde ao instante em que são atingidos os critérios de falha previamente estabelecidos, considerando simultaneamente os efeitos da degradação térmica dos materiais e da resposta mecânica associada ao carregamento aplicado. Dessa forma, o tempo de ruptura é tratado como a grandeza que sintetiza o comportamento global do sistema sob condições térmicas e mecânicas combinadas.

Assim, o modelo de regressão desenvolvido busca estabelecer uma relação funcional entre as variáveis independentes, relacionadas à geometria, às barras de aço e à sua posição, e a variável dependente, correspondente ao tempo de ruptura. Essa formulação permite compreender a influência relativa de cada parâmetro de entrada no desempenho estrutural ao longo do tempo, além de fornecer uma ferramenta analítica para a estimativa do comportamento do sistema em cenários similares aos analisados numericamente.

4.2.4.1 Construção do banco de dados e divisão amostral

Os dados utilizados foram provenientes de simulações numéricas previamente realizadas e organizados em planilhas contendo as variáveis geométricas e mecânicas relevantes. A base foi aleatoriamente dividida em dois subconjuntos: treinamento (80%) e validação (20%), permitindo avaliar a capacidade preditiva do modelo em dados não utilizados

na etapa de ajuste. Essa estratégia reduz o risco de sobreajuste e segue práticas usuais em modelos baseados em aprendizado de máquina (Angelis, Sofos e Karakasidis, 2023).

Os parâmetros adotados (Tabela 59) no algoritmo foram definidos conforme apresentado no Quadro correspondente, incluindo número de iterações, tamanho máximo das expressões, operadores matemáticos disponíveis, número de populações e critério de seleção baseado na acurácia. Essa configuração delimita o espaço de busca matemática e controla a complexidade das equações geradas, evitando tanto simplificações excessivas quanto crescimento desnecessário de termos (fenômeno conhecido como *bloat*)

Tabela 62 - Parâmetros do modelo de regressão simbólica.

Parâmetros	Valores
Número de iterações	50000
Tamanho máximo	30
Operadores binários	+, *, -, /
Operadores unitários	Cubo, quadrado
População	31
Tamanho da população	200
Seleção Modelo	Acurácia
Variáveis de entrada	Largura da viga (b), altura da seção da viga (h), comprimento da viga (L), área de aço (A_s), distância entre o centro geométrico da barra até a superfície inferior da viga (d').
Variável de resposta	Tempo de resistência ao fogo (t)

Fonte: Próprio autor (2025).

4.2.4.2 Considerações acerca da regressão simbólica

O conjunto de equações geradas foi analisado com base na relação entre complexidade estrutural e erro de previsão, permitindo identificar soluções pertencentes à fronteira de Pareto entre precisão e simplicidade. A equação selecionada correspondeu àquela que apresentou equilíbrio entre baixo erro global e complexidade moderada, garantindo interpretabilidade e robustez.

A validação do modelo foi conduzida por meio da análise de métricas estatísticas globais (coeficiente de determinação, erro quadrático médio e erro percentual médio absoluto) e pela inspeção gráfica das relações entre valores observados e preditos, bem como da distribuição dos resíduos, assegurando consistência preditiva tanto no conjunto de treinamento quanto no de validação

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos a partir das análises termomecânicas acopladas, realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos. Os resultados são organizados e apresentados na forma de 24 gráficos, nos quais se estabelece a relação entre tempo e força, permitindo a avaliação da evolução da resposta estrutural das vigas ao longo da exposição ao incêndio padrão.

A escolha da representação gráfica no formato tempo *versus* força está diretamente associada à estratégia de modelagem adotada nas análises termomecânicas. Conforme descrito nos capítulos anteriores, o comportamento estrutural foi avaliado a partir da aplicação de deslocamento prescrito, o que conduz a uma resposta mais estável em análises não lineares, especialmente quando há degradação progressiva das propriedades mecânicas em função da temperatura. Nessa abordagem, a força reativa calculada pelo software passa a ser a grandeza mais representativa do desempenho estrutural ao longo do tempo, justificando sua utilização como variável de saída nos gráficos apresentados.

Adicionalmente, ressalta-se que os resultados foram extraídos em um ponto do modelo situado na região plástica do material, onde os efeitos não lineares associados à degradação térmica e à redistribuição de tensões tornam-se mais pronunciados. Nessas condições, a apresentação dos resultados em termos de força mostra-se mais coerente do ponto de vista físico e numérico, uma vez que reflete diretamente a perda de capacidade resistente da viga ao longo do aquecimento, evitando interpretações ambíguas que poderiam surgir da análise exclusiva de deslocamentos em regime pós-elástico.

Para facilitar a leitura, a interpretação e a comparação entre os 168 modelos analisados, foi adotada uma nomenclatura padronizada para a identificação das vigas ao longo deste capítulo. Essa nomenclatura condensa, de forma objetiva, as principais características geométricas e construtivas de cada modelo numérico, permitindo a rápida associação entre os gráficos apresentados e os parâmetros que os definem.

A designação genérica, como exemplo, $MD\#(l)x(h)x(C)_{B\emptyset pos\emptyset}$ deve ser interpretada da seguinte forma: o prefixo MD refere-se ao termo *modelo*, enquanto o número $\#$ indica a identificação sequencial do modelo analisado. A sequência $(l)x(h)x(C)$ corresponde, respectivamente, à largura, altura e comprimento dos elementos, expressos em milímetros. A notação $B\emptyset$ indica a utilização de barras de aço e ao diâmetro nominal de cada vergalhão, enquanto a expressão $pos\emptyset$ representa a posição relativa das barras em relação a face inferior

em função da altura (h) da seção transversal, indicando seu afastamento e simetria em torno desse ponto.

Dessa forma, a organização dos resultados ao longo deste capítulo busca não apenas apresentar os dados obtidos, mas também fornece uma base clara e consistente para a discussão comparativa do comportamento termomecânico das vigas, permitindo a identificação dos efeitos da geometria, da armadura e do posicionamento das barras na resposta estrutural sob condições de incêndio.

Importante mencionar que foram excluídos 13 modelos (7,7%) dos 168 processados numericamente. Isso se deve ao fato de que esses modelos retirados da análise sofreram rotação durante o processamento, retornando resultados incoerentes quanto ao tempo de ruptura *versus* força. Sugere-se que essa rotação ocorreu, pois nessa configuração em específico, a camada carbonizada fez com que a viga rompesse em parte do apoio inicialmente, fazendo com que o deslocamento aplicado no ponto de referência da chapa do atuador promovesse a rotação do elemento estrutural. Os modelos retirados estão elencados na [Tabela 60](#).

Tabela 63 - Modelos excluídos da análise de resultados.

Modelo	Bloco
MD74_Viga_100x300x4000_B8_1/6	11
MD81_Viga_100x250x4000_B10_1/4	8
MD82_Viga_100x250x4000_B10_1/6	8
MD97_Viga_200x300x3000_B8_1/4	13
MD98_Viga_200x300x3000_B8_1/6	13
MD99_Viga_200x300x3000_B10_1/4	13
MD100_Viga_200x300x3000_B10_1/6	13
MD112_Viga_200x300x5000_B10_1/6	15
MD116_Viga_200x400x3000_B8_1/6	16
MD117_Viga_200x400x3000_B10_1/4	16
MD119_Viga_200x400x3000_B12,5_1/4	16
MD120_Viga_200x400x3000_B12,5_1/6	16
MD168_Viga_200x600x5000_B12,5_1/6	24

Fonte: Próprio Autor (2026).

Por fim, com o intuito de organizar a análise e tornar a discussão dos resultados mais clara, os gráficos obtidos foram agrupados em blocos de resultados, definidos de acordo com as características geométricas e construtivas das vigas analisadas. Dessa forma, este capítulo encontra-se estruturado em 24 subitens, sendo que cada subitem corresponde a um bloco específico de resultados e contempla a apresentação e a discussão individual de um gráfico

tempo *versus* força, permitindo uma avaliação detalhada e comparativa do comportamento termomecânico das diferentes configurações estudadas.

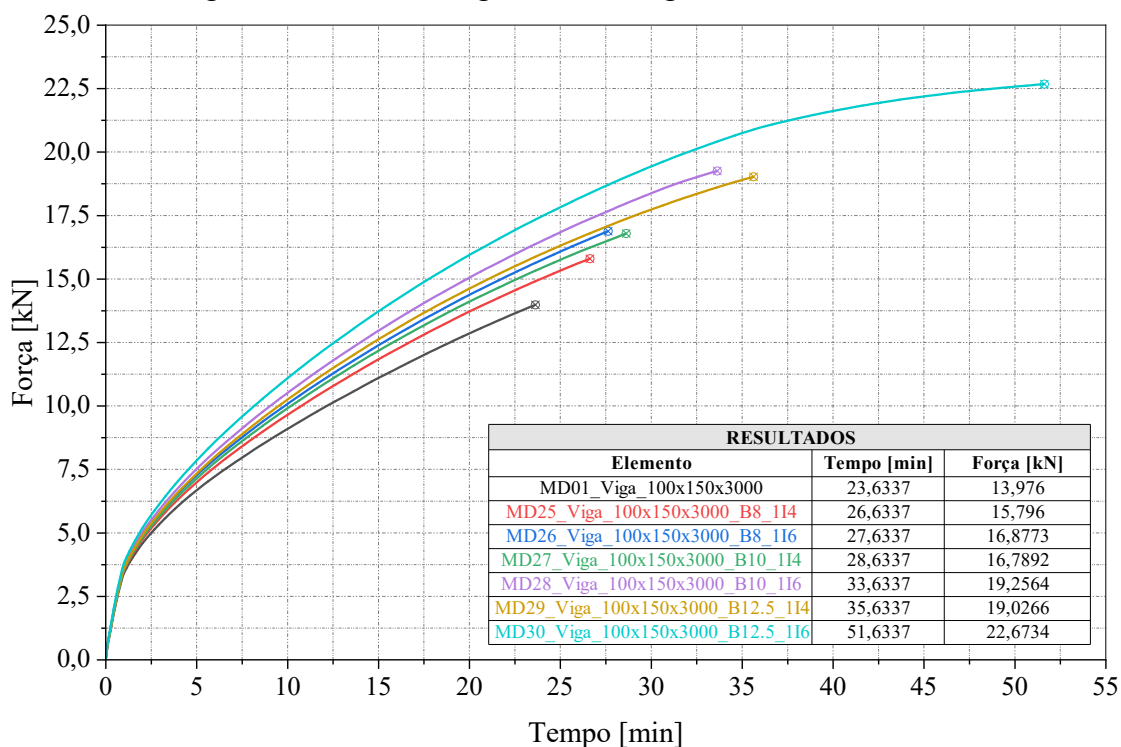
5.1 BLOCO 1 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X3000

5.1.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 1

Observa-se na [Figura 75](#), inicialmente, que todas as vigas reforçadas apresentam desempenho superior em relação ao modelo de referência MD01, tanto em termos de força máxima resistida quanto no tempo necessário para atingir o estado limite analisado. Esse comportamento evidencia a contribuição positiva das barras de aço na resposta termomecânica do sistema, mesmo sob exposição ao incêndio padronizado.

A curva correspondente ao modelo sem reforço (MD01) apresenta o menor tempo resistente (23,63 min) e a menor força associada (13,98 kN). A introdução de barras de aço, ainda que com pequenos diâmetros, promove um retardamento significativo da perda de capacidade resistente, refletindo-se no deslocamento das curvas para patamares mais elevados de tempo e força.

Figura 75 - Resultados gráficos das vigas 100x150x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

De forma geral, verifica-se que o aumento do diâmetro das barras resulta em incrementos progressivos tanto na força quanto no tempo resistente. A posição das barras em relação à face inferior (1/4 ou 1/6) também influencia o desempenho, sendo observada, em vários casos, vantagem para configurações mais afastadas do centro, onde o braço resistente é maior. O modelo MD30 destaca-se como o de melhor desempenho global, alcançando mais que o dobro do tempo resistente da viga sem reforço.

5.1.2 Análise comparativa de resultados do bloco 1

Tomando o modelo MD01 (viga sem reforço) como base de comparação, avaliou-se (Tabela 61) o ganho percentual de força e de tempo de resistência ao fogo para cada configuração reforçada. O aumento de força varia entre 13% e 62,2%, e o aumento do tempo resistente varia de forma mais expressiva, situando-se entre 12,7% e 118%, evidenciando que o principal benefício do reforço metálico está associado à extensão do tempo de resistência ao incêndio, mais do que apenas ao ganho de capacidade mecânica instantânea.

Tabela 64 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD01 - Sem reforço	-	-
MD25 - B8 1/4	+12,7%	+13,0%
MD26 - B8 1/6	+17,0%	+20,7%
MD27 - B10 1/4	+21,2%	+20,1%
MD28 - B10 1/6	+42,4%	+37,8%
MD29 - B12,5 1/4	+50,8%	+36,2%
MD30 - B12,5 1/6	+118,5%	+62,2%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.1.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 1

Os resultados demonstram de forma clara que a inclusão de barras de aço atua como um mecanismo eficaz de retardo da degradação estrutural sob incêndio, principalmente ao absorver parte dos esforços mecânicos à medida que a rigidez e resistência da madeira são reduzidas pelo aumento da temperatura.

O crescimento percentual do tempo resistente é substancialmente superior ao crescimento da força, assim reforça-se a hipótese central do trabalho de que o reforço metálico não apenas aumenta a capacidade resistente, mas prolonga significativamente o tempo

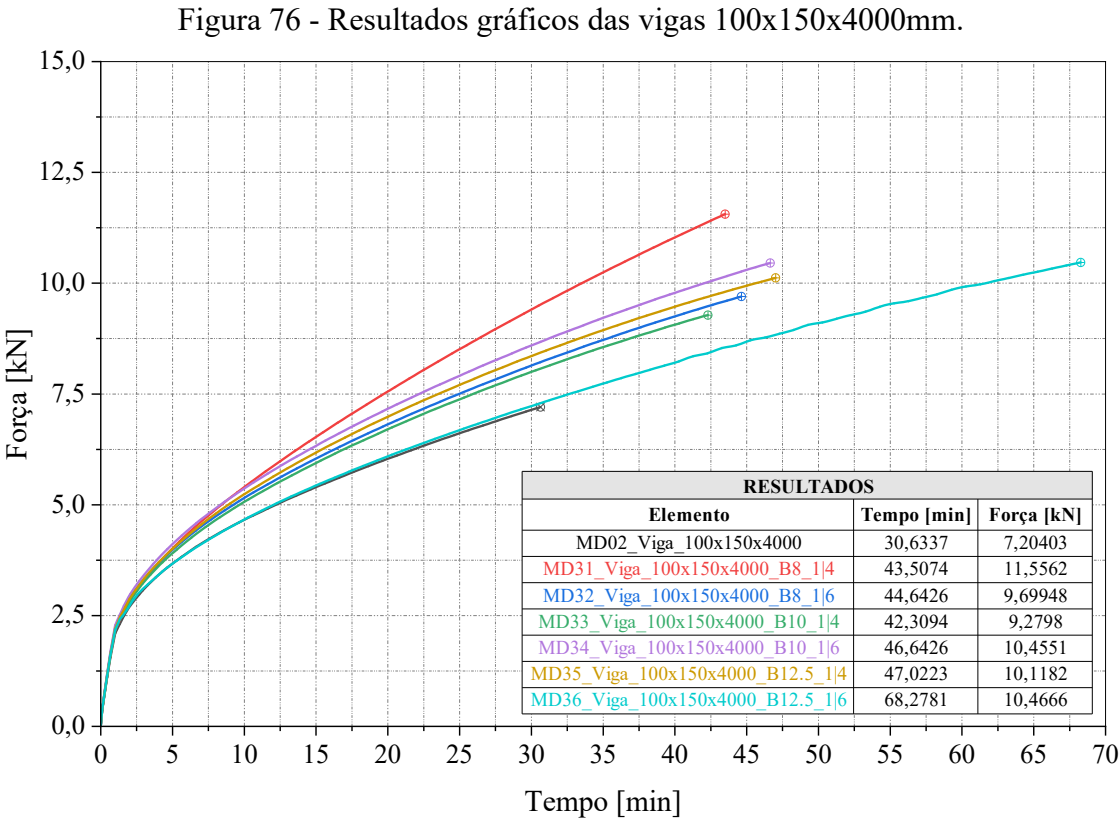
disponível antes do colapso estrutural, aspecto fundamental em projetos de segurança contra incêndio.

Destaca-se, por fim, que as configurações com barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas do centro geométrico apresentam desempenho significativamente superior, indicando uma combinação ótima entre contribuição mecânica e eficiência termomecânica, resultado diretamente associado a maior inércia resistente e à melhor redistribuição de esforços durante o aquecimento.

5.2 BLOCO 2 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X4000

5.2.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 2

As curvas de força *versus* tempo obtidas para as vigas com comprimento de 4,00 m (Figura 76), evidenciam a capacidade das barras de aço em retardar a degradação estrutural provocada pelo incêndio. Comparativamente ao modelo sem reforço, todas as configurações reforçadas apresentam deslocamento das curvas para tempos mais elevados, indicando maior resistência à ação térmica.



Fonte: Próprio Autor (2026).

Diferentemente do bloco anterior, para este comprimento, os incrementos de força não seguem tendência monotônica crescente com o aumento do diâmetro das barras. Em alguns casos, o ganho principal manifesta-se quase exclusivamente no tempo de exposição suportado, enquanto a força associada permanece próxima à do modelo de referência. Esse comportamento reforça a natureza predominantemente termomecânica do problema, no qual o aço atua como elemento de redistribuição de esforços à medida que a madeira perde rigidez com o avanço da temperatura.

A análise conjunta dos modelos indica que a posição 1/6, mais afastada do centro geométrico, continua apresentando melhor desempenho global em termos de tempo resistente. O efeito do aumento do diâmetro das barras é mais perceptível no prolongamento do tempo até o estado limite do que no acréscimo direto de força. O modelo MD36 destaca-se de forma significativa, alcançando um tempo de resistência superior a 68 minutos, valor substancialmente maior que o obtido para a viga sem reforço.

Esse resultado sugere que, para vigas mais esbeltas, o reforço metálico atua sobretudo como um mecanismo de atraso do colapso, ainda que o nível de força resistida no ponto analisado não aumente de maneira proporcional.

5.2.2 Análise comparativa de resultados do bloco 2

Com base nos valores extraídos dos resultados numéricos, foi realizada a quantificação dos ganhos percentuais de tempo e força ([Tabela 62](#)), tomando-se como referência a viga MD02, desprovida de reforço metálico, a fim de estabelecer um parâmetro comparativo homogêneo entre os diferentes modelos analisados. A análise percentual, ao normalizar os resultados em relação ao modelo de referência, facilita a identificação das configurações mais eficientes, além de fornecer subsídios quantitativos consistentes para a discussão comparativa.

Tabela 65 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD02 - Sem reforço	—	—
MD31 - B8 1/4	+42,0%	+60,4%
MD32 - B8 1/6	+45,8%	+34,7%
MD33 - B10 1/4	+38,1%	+28,8%
MD34 - B10 1/6	+52,3%	+45,2%
MD35 - B12,5 1/4	+53,5%	+40,5%
MD36 - B12,5 1/6	+122,9%	+45,4%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.2.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 2

Os resultados confirmam que, para vigas com maior comprimento, a principal contribuição do reforço metálico está associada ao aumento expressivo do tempo resistente ao fogo, melhorando-o significativamente em relação ao desempenho da viga sem reforço. Para este bloco, a viga MD36 apresentou o melhor desempenho aumentando em 122,9% o tempo de exposição ao fogo até o colapso em comparação com a viga MD02 sem reforço.

Embora os ganhos de força sejam relevantes, especialmente para as configurações com barras de menor diâmetro, o comportamento global indica que o reforço atua de maneira mais eficiente como elemento de suporte residual durante a degradação térmica da madeira, do que como simples amplificador da capacidade resistente inicial.

Nesse bloco de resultados é demonstrado que a estratégia de incluir barras de aço em vigas de madeira permite ampliar significativamente a margem de segurança estrutural sob incêndio, sobretudo no que concerne ao tempo disponível para evacuação, combate ao fogo ou colapso progressivo.

5.3 BLOCO 3 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X150X5000

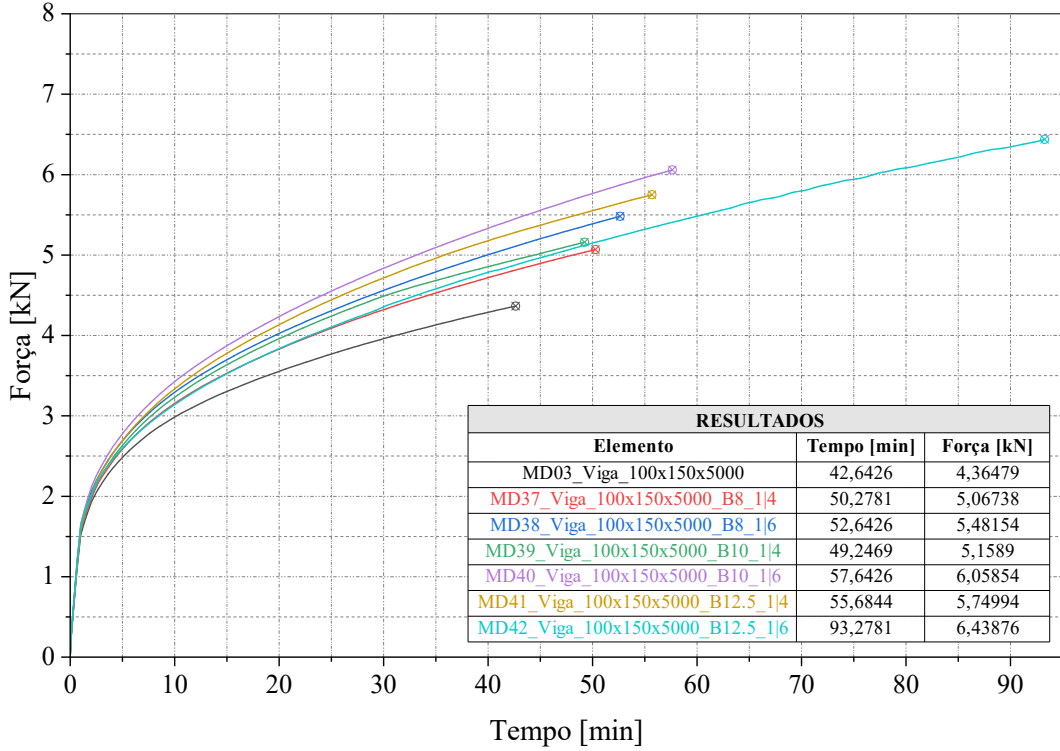
5.3.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 3

O terceiro bloco de resultados ([Figura 77](#)) contempla vigas com seção transversal de 100×150 mm e comprimento de 5000 mm, submetidas à análise termomecânica acoplada sob carregamento prescrito. A viga MD03_Viga_100x150x5000, sem reforço metálico, foi adotada como modelo de referência, apresentando um tempo resistente de 42,64 min e força correspondente de 4,36 kN no ponto analisado, localizado no regime plástico.

A inclusão de barras de aço embutidas resultou em aumentos sistemáticos do tempo necessário para a perda de capacidade resistente, confirmando o efeito benéfico do reforço metálico na mitigação dos efeitos da degradação térmica da madeira. Observa-se, de forma global, que o incremento do diâmetro das barras e o posicionamento mais afastado do centro geométrico da seção conduzem a maiores tempos de exposição ao fogo, destacando-se a configuração MD42, que atingiu um tempo resistente superior a 93 min, dobrando o desempenho do modelo sem reforço.

Em termos de força, os resultados indicam aumentos progressivos e pequenos à medida que o reforço se torna mais robusto, embora o ganho em tempo de resistência seja significativamente mais expressivo que o ganho em força.

Figura 77 - Resultados gráficos das vigas 100x150x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.3.2 Análise comparativa de resultados do bloco 3

A [Tabela 63](#) constitui os ganhos percentuais de tempo e força de cada modelo reforçado em relação à viga de referência MD03_Viga_100x150x5000.

Tabela 66 - Resultados comparativos das vigas de 100x150x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD03 - Sem reforço	—	—
MD37 - B8 1/4	+17,9%	+16,1%
MD38 - B8 1/6	+23,4%	+25,6%
MD39 - B10 1/4	+15,5%	+18,2%
MD40 - B10 1/6	+35,1%	+38,8%
MD41 - B12,5 1/4	+30,6%	+31,8%
MD42 - B12,5 1/6	+118,8%	+47,6%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.3.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 3

Do ponto de vista termomecânico, o aço contribui para a redistribuição de esforços à medida que a seção de madeira sofre redução progressiva devido à carbonização, permitindo que a viga mantenha sua capacidade resistente por períodos mais prolongados. O ganho expressivo de tempo observado nos modelos com barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas do centro geométrico pode ser explicado pela maior participação do aço no braço resistente da seção, além da sua capacidade de absorver e redistribuir tensões mesmo sob elevação de temperatura. Ademais, a atuação conjunta do aço e da madeira reduz a taxa de crescimento das deformações plásticas, o que se reflete diretamente no aumento do tempo até o estado limite considerado.

Embora os incrementos de força sejam relevantes, especialmente nos modelos mais robustos, a análise evidencia que o principal benefício estrutural do reforço metálico, para este caso, está associado ao aumento do tempo de exposição ao fogo, aspecto fundamental para o atendimento aos requisitos normativos de segurança contra incêndio e para a preservação da estabilidade global da estrutura durante o sinistro.

5.4 BLOCO 4 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X3000

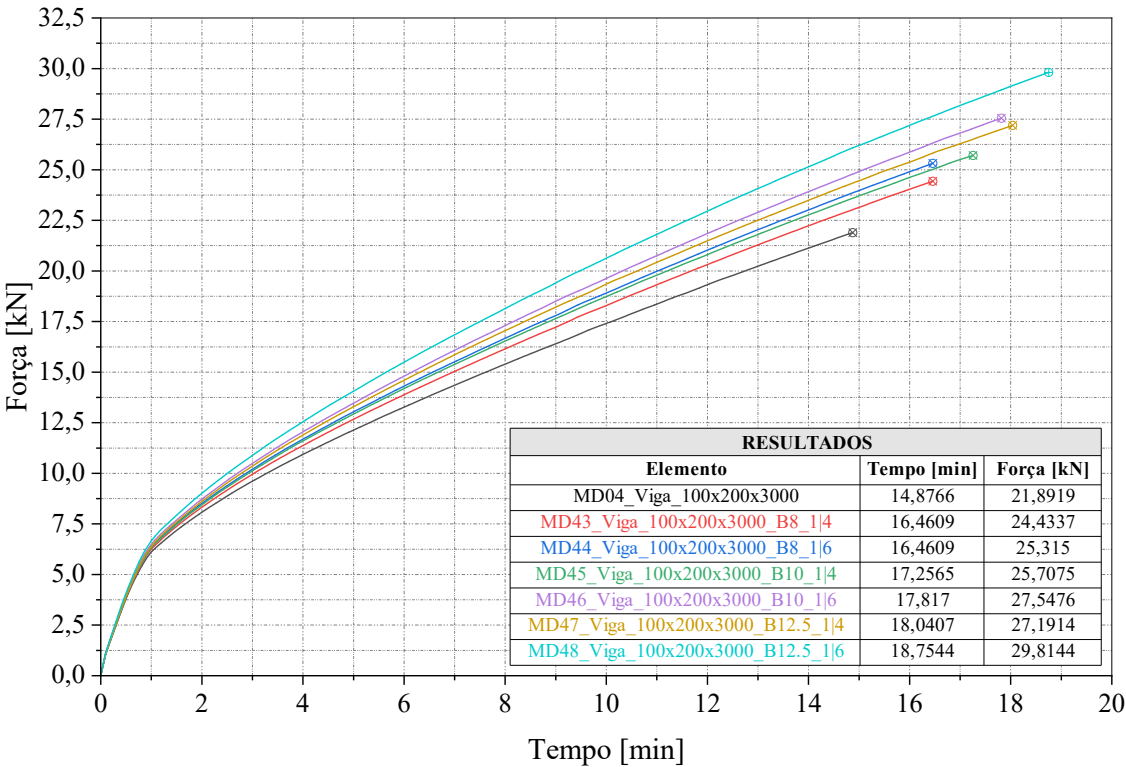
5.4.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 4

O quarto bloco de resultados ([Figura 78](#)) corresponde às vigas com seção transversal de 100×200 mm e comprimento de 3000 mm, analisadas sob regime termomecânico acoplado e carregamento por deslocamento prescrito. O modelo MD04_Viga_100x200x3000, sem reforço metálico, apresentou tempo resistente de 14,88 min, associado a uma força de 21,89 kN, sendo adotado como referência para a análise comparativa.

A introdução de barras de aço embutidas promoveu um aumento tanto no tempo de exposição ao fogo quanto na força resistente desenvolvida no ponto analisado. Diferentemente dos blocos anteriores, observa-se que, para essa geometria, os ganhos de força são mais expressivos, reflexo direto do aumento da altura da seção, que potencializa a contribuição do aço no braço resistente. Ainda assim, o parâmetro mais impactado pela presença do reforço permanece sendo o tempo até a perda da capacidade resistente, evidenciando a eficiência da solução na mitigação dos efeitos térmicos.

O melhor desempenho global foi observado no modelo MD48, que atingiu aproximadamente 18,75 min, representando um prolongamento significativo da resistência ao fogo quando comparado à viga sem reforço.

Figura 78 - Resultados gráficos das vigas 100x200x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.4.2 Análise comparativa de resultados do bloco 4

A Tabela 64 a seguir mostra os incrementos percentuais de tempo e força obtidos para cada configuração reforçada, tomando como base o modelo MD04_Viga_100x200x3000.

Tabela 67 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x3000mm.

Modelo	Tempo [min]	Tempo [%]	Força [kN]	Força [%]
MD04 - Sem reforço	14,88	—	21,89	—
MD43 - B8 1/4	16,46	+10,6%	24,43	+11,6%
MD44 - B8 1/6	16,46	+10,6%	25,32	+15,6%
MD45 - B10 1/4	17,26	+16,0%	25,71	+17,4%
MD46 - B10 1/6	17,82	+19,8%	27,55	+25,8%
MD47 - B12,5 1/4	18,04	+21,3%	27,19	+24,2%
MD48 - B12,5 1/6	18,75	+26,1%	29,81	+36,2%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.4.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 4

O comportamento observado no Bloco 4 confirma que a eficácia do reforço metálico em vigas de madeira está fortemente associada à geometria da seção transversal. O aumento da altura da viga intensifica a participação das barras de aço no mecanismo resistente, sobretudo quando posicionadas mais afastadas do centro geométrico, o que explica os ganhos expressivos de força observados nas configurações com barras de maior diâmetro.

Sob o ponto de vista termomecânico, o aço atua como elemento de redistribuição de esforços à medida que a madeira sofre degradação térmica e redução progressiva de seção resistente. Embora o incremento absoluto de tempo seja menor quando comparado a vigas mais esbeltas, o ganho percentual permanece relevante, evidenciando que mesmo em seções mais robustas a inclusão de barras de aço contribui para retardar o colapso estrutural em situação de incêndio.

Assim, os resultados deste bloco reforçam a conclusão de que a estratégia de reforço com barras de aço embutidas não apenas aumenta a capacidade resistente residual, mas também promove um prolongamento efetivo do tempo de exposição ao fogo.

5.5 BLOCO 5 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X4000

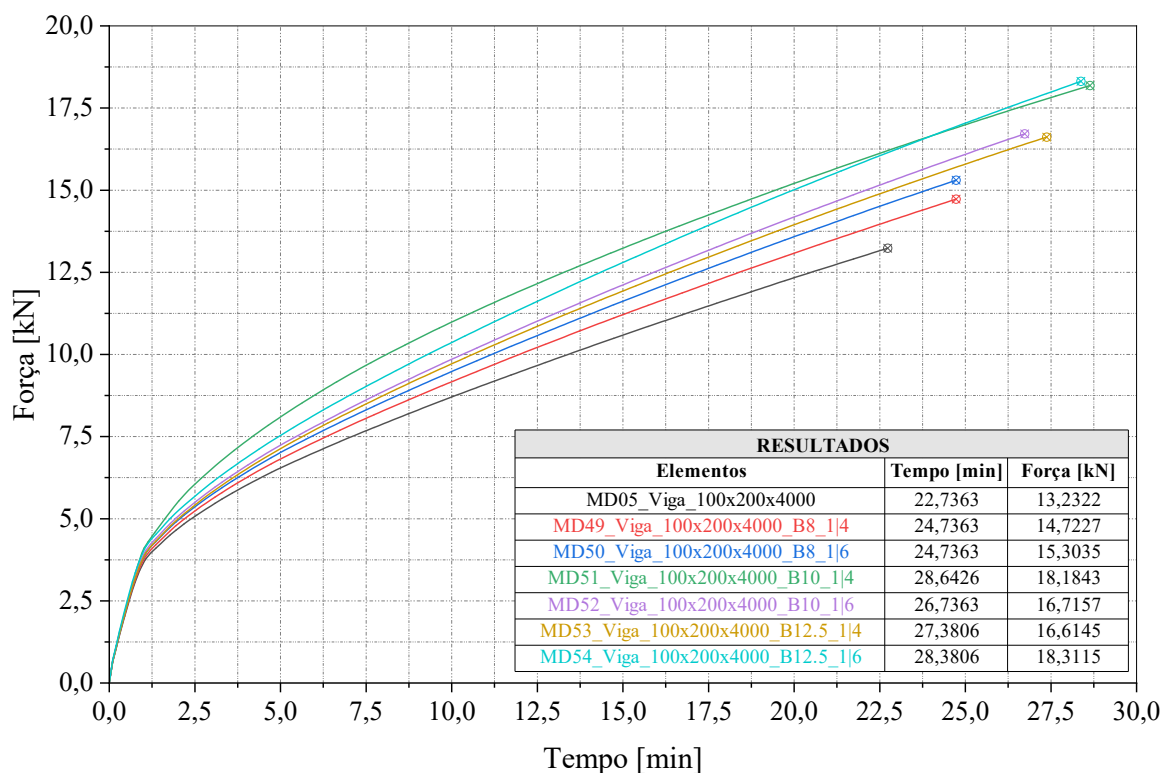
5.5.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 5

O quinto bloco de resultados ([Figura 79](#)) contempla vigas com seção transversal de 100×200 mm e comprimento de 4000 mm, submetidas à análise termomecânica acoplada sob carregamento por deslocamento imposto. O modelo de referência, MD05_Viga_100x200x4000, sem reforço em aço, apresentou tempo resistente de 22,73 min, associado a uma força de 13,23 kN, caracterizando o desempenho base para a comparação dos modelos reforçados.

A inclusão das barras de aço resultou em um incremento do tempo de exposição ao fogo, evidenciando novamente a eficiência do reforço metálico na mitigação da degradação térmica da madeira. Observa-se que, para esta esbeltez, os ganhos de tempo são ainda mais pronunciados do que aqueles verificados no bloco anterior, indicando que o comprimento da viga exerce influência direta na magnitude do benefício proporcionado pelo aço embutido. Em termos de força, os modelos reforçados também apresentaram aumento relevante, embora o efeito mais expressivo permaneça associado ao prolongamento do tempo até o estado limite.

O melhor desempenho global foi identificado nos modelos MD51 e MD54, ambos com barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas do centro geométrico, os quais atingiram tempos próximos de 28,38 minutos.

Figura 79 - Resultados gráficos das vigas 100x200x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.5.2 Análise comparativa de resultados do bloco 5

A Tabela 65 a seguir sintetiza os ganhos percentuais de tempo e força obtidos para cada configuração reforçada, tomando como base o modelo MD05_Viga_100x200x4000.

Tabela 68 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD05 - Sem reforço	—	—
MD49 - B8 1/4	+8,8%	+11,3%
MD50 - B8 1/6	+8,8%	+15,6%
MD51 - B10 1/4	+26,0%	+37,4%
MD52 - B10 1/6	+17,6%	+26,3%
MD53 - B12,5 1/4	+20,4%	+25,6%
MD54 - B12,5 1/6	+24,8%	+38,4%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.5.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 5

Os resultados demonstram que o tempo de resistência ao fogo aumentou entre aproximadamente 8,8% e 26,0%. O maior ganho ocorreu no modelo com barras de diâmetro 10mm, posicionada na região 1/4. O incremento de força foi particularmente significativo nos modelos MD51 e MD54, com 37,4% e 35% respectivamente, quando comparados à viga sem reforço.

O aumento do tempo resistente observado neste bloco também confirma que as barras de aço atuam como elementos de suporte residual, retardando a perda global de capacidade resistente do sistema estrutural. Adicionalmente, a posição mais afastada do centro geométrico potencializa o efeito do reforço, uma vez que aumenta o braço de alavanca resistente, justificando os melhores desempenhos obtidos nas configurações do tipo 1/6.

Dessa forma, este bloco reforça a conclusão de que a adoção de barras de aço embutidas em vigas de madeira não apenas incrementa a força resistente, mas, sobretudo, contribui para o aumento do tempo de exposição ao fogo, atendendo diretamente ao objetivo central deste trabalho.

5.6 BLOCO 6 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X200X5000

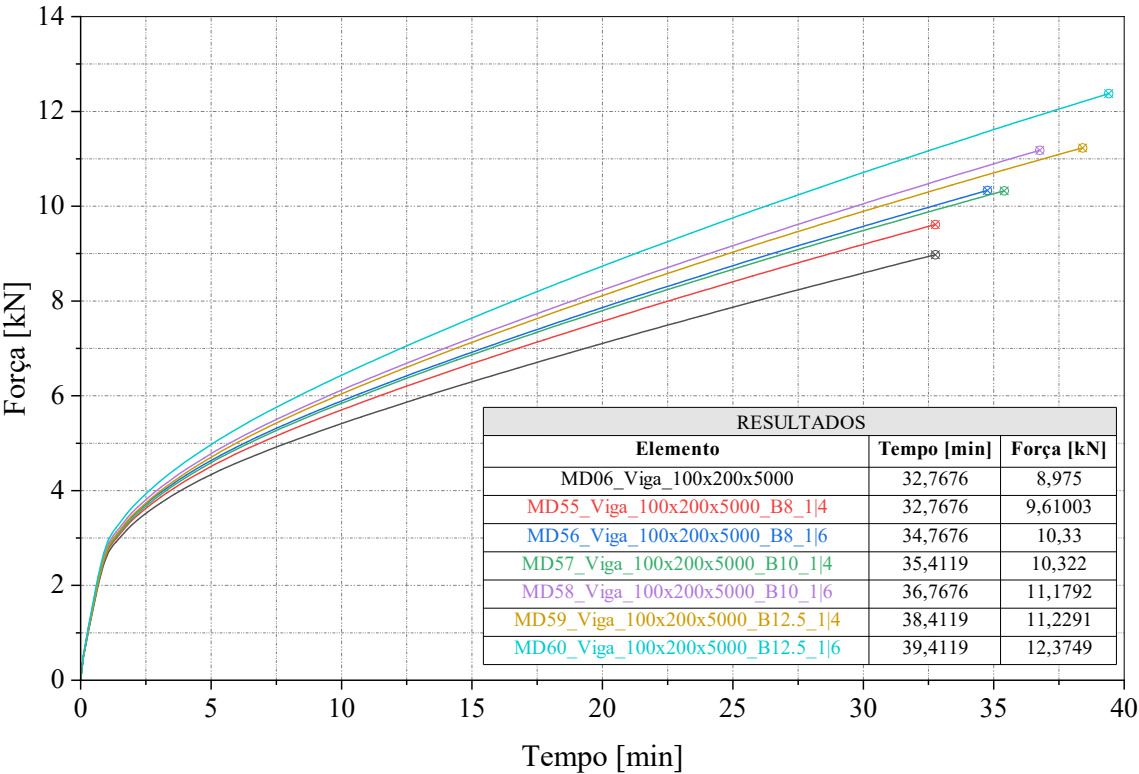
5.6.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 6

O sexto bloco de resultados ([Figura 80](#)) contempla vigas com seção transversal de 100×200 mm e comprimento de 5000 mm, representando o conjunto estrutural de maior esbeltez analisado neste trabalho. O modelo de referência sem reforço, MD06_Viga_100x200x5000, apresentou tempo resistente de 32,76 min, associado a uma força máxima de 8,97 kN, caracterizando o desempenho basal da viga exclusivamente em madeira sob ação térmica e carregamento por deslocamento imposto.

A introdução de barras de aço embutidas promoveu incrementos tanto no tempo de exposição ao fogo quanto na força resistente. De forma geral, o aumento do comprimento da viga intensifica a contribuição do reforço metálico, resultando em ganhos à medida que se eleva o diâmetro das barras e se altera sua posição em relação ao centro geométrico da seção. Os modelos reforçados apresentaram tempos resistentes variando de 32,76 min a 39,41 min, evidenciando um prolongamento significativo da capacidade estrutural frente ao incêndio.

O melhor desempenho global foi observado no modelo MD608, que atingiu aproximadamente 39,41 min, acompanhado do maior valor de força entre os modelos analisados. Esse comportamento confirma a tendência já observada nos blocos anteriores, na qual barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas do centro geométrico maximizam o efeito benéfico do reforço.

Figura 80 - Resultados gráficos das vigas 100x200x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.6.2 Análise comparativa de resultados do bloco 6

A análise apresentada na [Tabela 66](#) denota, de forma quantitativa, o impacto positivo da introdução do reforço metálico no desempenho termomecânico das vigas analisadas. Observa-se que todos os modelos reforçados apresentam incrementos consistentes tanto no tempo até a ruptura quanto na força resistente máxima, quando comparados à viga de referência MD06_Viga_100x200x5000, desprovida de armadura metálica. Esses ganhos percentuais refletem a maior capacidade do sistema reforçado em redistribuir esforços internos ao longo do aquecimento, retardando o colapso estrutural mesmo diante da progressiva degradação das propriedades da madeira e da redução da seção resistente em função da carbonização.

Tabela 69 - Resultados comparativos das vigas de 100x200x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD06 - Sem reforço	—	—
MD55 - B8 1/4	0,0%	+7,1%
MD56 - B8 1/6	+6,1%	+15,1%
MD57 - B8 1/4	+8,0%	+15,0%
MD58 - B8 1/6	+12,2%	+24,5%
MD59 - B8 1/4	+17,2%	+25,1%
MD60 - B8 1/6	+20,3%	+37,8%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.6.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 6

O tempo de resistência ao fogo aumentou em até aproximadamente 20% em relação à viga sem reforço. Os ganhos de força foram ainda mais expressivos, atingindo quase 38% no modelo com barras de 12,5 mm posicionadas em 1/6. Os resultados do Bloco 6 avigoram a eficiência da inclusão de barras de aço embutidas em vigas de madeira submetidas à ação do fogo, especialmente em elementos de maior esbeltez. À medida que a temperatura se eleva e a seção resistente da madeira é gradativamente reduzida pelo processo de carbonização, o aço passa a assumir parcela crescente dos esforços, retardando o colapso estrutural.

O aumento expressivo do tempo resistente observado nos modelos com barras de maior diâmetro evidencia que a capacidade térmica e mecânica do aço desempenha papel fundamental na manutenção da integridade estrutural durante o incêndio. Além disso, a posição 1/6 mostrou-se mais eficiente do que 1/4, pois maximiza o braço resistente e favorece a redistribuição dos esforços internos, resultando em maiores valores de força e maior estabilidade global do sistema.

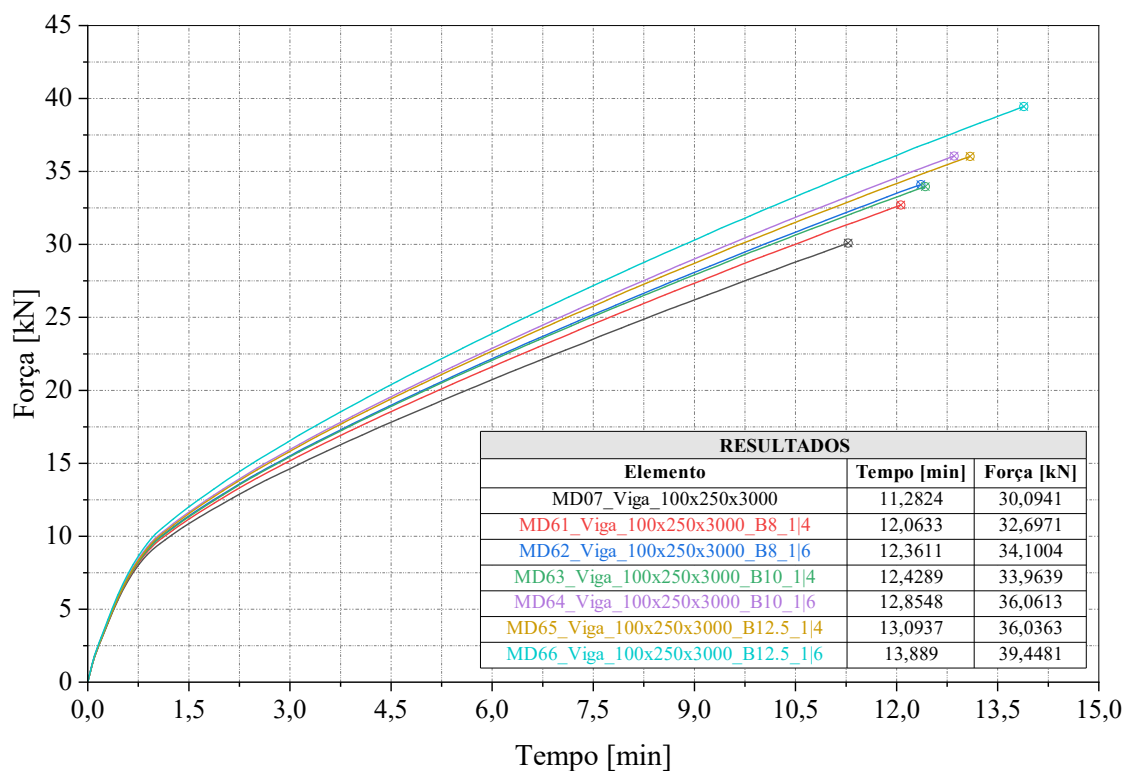
Comparativamente aos blocos anteriores, nota-se que o efeito do reforço metálico se torna mais pronunciado conforme o comprimento da viga aumenta, indicando que a estratégia de reforço é particularmente vantajosa para elementos estruturais mais esbeltos. Assim, os resultados do Bloco 6 corroboram o objetivo central deste estudo, demonstrando que a inclusão de barras de aço embutidas constitui uma solução eficaz para o aumento do tempo de resistência ao fogo e da capacidade resistente de vigas de madeira.

5.7 BLOCO 7 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X3000

5.7.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 7

O Bloco 7 (Figura 81) contempla vigas com seção transversal de 100×250 mm e comprimento de 3000 mm, representando elementos estruturais com elevada altura de seção e menor comprimento em comparação aos blocos anteriores. A viga de referência, MD07_Viga_100x250x3000, sem reforço metálico, apresentou tempo resistente de 11,28 min e força máxima de 30,09 kN, caracterizando o desempenho térmico-mecânico basal do elemento exclusivamente em madeira.

Figura 81 - Resultados gráficos das vigas 100x250x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A inclusão de barras de aço embutidas resultou em incrementos sistemáticos tanto no tempo de resistência ao fogo quanto na força resistente. Os modelos reforçados atingiram tempos entre 12,06 min e 13,89 min, indicando um prolongamento significativo da capacidade estrutural frente à exposição térmica, mesmo para um elemento com elevada rigidez inicial. O comportamento global evidencia que, apesar do menor tempo absoluto de resistência quando

comparado a vigas mais esbeltas, o reforço metálico mantém sua eficácia na ampliação da estabilidade estrutural sob incêndio.

O melhor desempenho global foi observado no modelo MD66, que atingiu aproximadamente 13,89 min e a maior força resistente do bloco, confirmando novamente a influência positiva do aumento do diâmetro das barras e de seu posicionamento mais afastado do centro geométrico da seção.

5.7.2 Análise comparativa de resultados do bloco 7

A [Tabela 67](#) a seguir mostra os ganhos percentuais de tempo e força dos modelos reforçados em relação à viga de referência MD07_Viga_100x250x3000, sem reforço metálico.

Tabela 70 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD07 - Sem reforço	—	—
MD61 - B8 1/4	+6,9%	+8,7%
MD62 - B8 1/6	+9,5%	+13,3%
MD63 - B10 1/4	+10,2%	+12,9%
MD64 - B10 1/6	+14,0%	+19,9%
MD65 - B12,5 1/4	+16,0%	+19,8%
MD66 - B12,5 1/6	+23,1%	+31,1%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.7.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 7

Os resultados do Bloco 7 mostram que o tempo resistente ao fogo apresentou ganhos de até 23%, a força resistente atingiu incrementos superiores a 30% e o posicionamento 1/6 mostrou-se sistematicamente mais eficiente do que 1/4, especialmente para barras de maior diâmetro. Mesmo em vigas com elevada altura de seção e menor comprimento, a inclusão de barras de aço embutidas exerce influência significativa no comportamento termomecânico sob ação do fogo. A redução do tempo absoluto de resistência, quando comparada a vigas mais longas, está associada à maior concentração de tensões e à rápida degradação da zona comprimida da madeira, decorrente do processo de carbonização.

Ainda assim, o reforço metálico atua como elemento de redistribuição de esforços, retardando a perda de capacidade resistente e permitindo que o sistema estrutural suporte níveis mais elevados de força por períodos mais prolongados. O aumento do diâmetro das barras

intensifica esse efeito, ao passo que o posicionamento mais afastado do centro geométrico potencializa o braço de alavanca interno, elevando a eficiência estrutural do reforço.

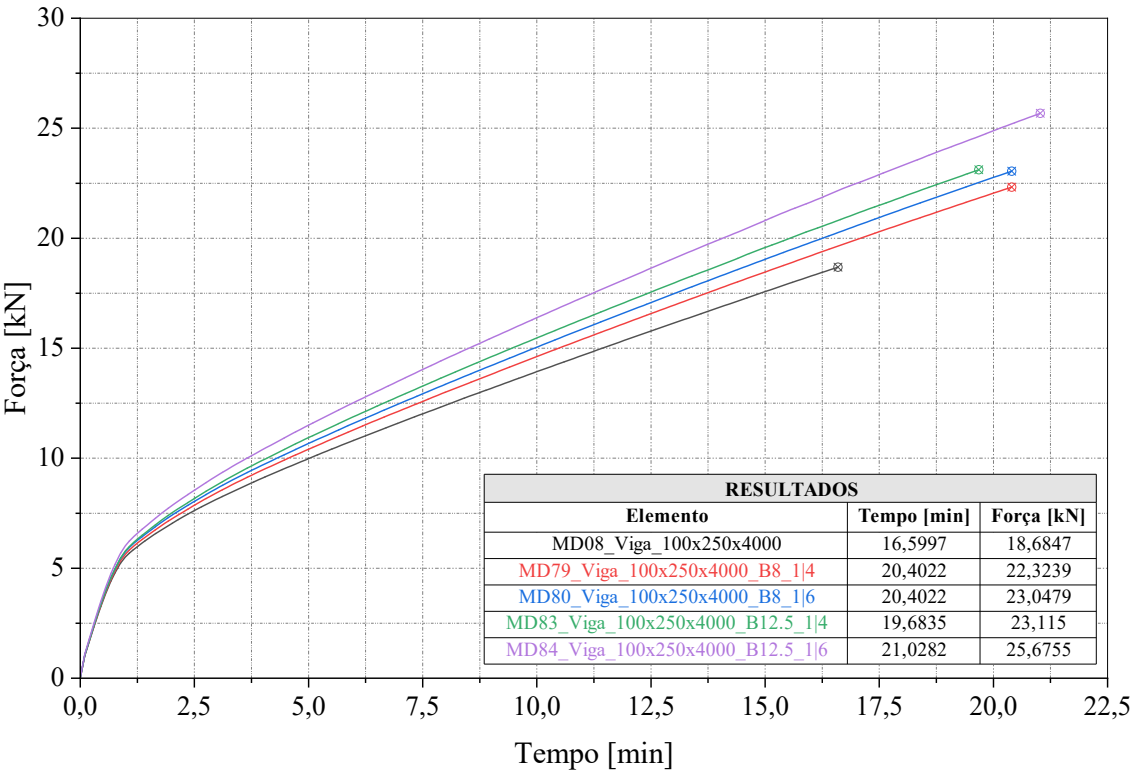
Comparativamente aos blocos anteriores, observa-se que o ganho percentual de força permanece elevado, mesmo quando os ganhos absolutos de tempo são menores. Isso indica que, para seções mais robustas, o principal benefício do reforço metálico está associado ao aumento da capacidade resistente, ao passo que o prolongamento do tempo de resistência ao fogo, embora relevante, assume papel secundário.

5.8 BLOCO 8 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X4000

5.8.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 8

O Bloco 8 (Figura 82) é constituído por vigas com seção transversal de 100×250 mm e comprimento de 4000 mm, o que caracteriza elementos mais esbeltos quando comparados aos modelos do Bloco 7.

Figura 82 - Resultados gráficos das vigas 100x250x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A viga de referência, MD08_Viga_100x250x4000, sem a presença de barras de aço, apresentou tempo resistente ao fogo de 16,60 min e força máxima de 18,68 kN, refletindo a resposta termomecânica típica de uma viga de madeira submetida à degradação progressiva das propriedades mecânicas em função do aumento de temperatura.

A introdução de barras de aço embutidas promoveu uma elevação tanto no tempo de resistência quanto na capacidade resistente do sistema. Os modelos reforçados atingiram tempos entre 19,68 min e 21,03 min, evidenciando um retardo significativo no colapso estrutural quando comparados à viga sem reforço. Do ponto de vista mecânico, as forças máximas alcançadas variaram de 22,32 kN a 25,68 kN, indicando que o reforço metálico contribui de forma efetiva para a sustentação das ações prescritas ao longo da exposição térmica.

O desempenho mais favorável foi observado no modelo MD84, no qual a combinação entre maior diâmetro da barra e posicionamento mais afastado do centro geométrico resultou nos maiores valores de tempo e força do bloco.

5.8.2 Análise comparativa de resultados do bloco 8

A [Tabela 68](#) a seguir demonstra os ganhos percentuais de tempo e força obtidos pelos modelos reforçados quando comparados à viga de referência MD08_Viga_100x250x4000.

Tabela 71 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD08 - Sem reforço	—	—
MD79 - B8 1/4	+22,9%	+19,5%
MD80 - B8 1/6	+22,9%	+23,4%
MD83 - B12,5 1/4	+18,6%	+23,7%
MD84 - B12,5 1/6	+26,7%	+37,4%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.8.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 8

Os resultados obtidos no Bloco 8 reforçam a eficiência do reforço metálico em vigas de madeira submetidas à ação do fogo. O aumento do comprimento em relação ao Bloco 7 favorece maiores deslocamentos e intensificação dos efeitos térmicos, o que torna a contribuição das barras de aço ainda mais relevante para a manutenção da integridade estrutural.

O tempo resistente ao fogo apresentou acréscimos próximos a 27% enquanto a capacidade resistente teve ganhos expressivos, alcançando valores superiores a 37%. A posição 1/6 mostrou-se novamente mais eficiente, sobretudo para barras de maior diâmetro.

O acréscimo de tempo resistente ao fogo está associado à capacidade das barras de aço de assumir parcela crescente dos esforços à medida que a seção de madeira é progressivamente reduzida pela carbonização. Em paralelo, o aumento da força resistente indica que o sistema misto madeira-aço apresenta maior eficiência na redistribuição de tensões, retardando a formação de mecanismos de colapso.

Observa-se, ainda, que o efeito do posicionamento das barras torna-se mais pronunciado para vigas mais longas, uma vez que o afastamento em relação ao centro geométrico amplia o braço de alavanca interno e potencializa a contribuição do aço na resistência à flexão.

5.9 BLOCO 9 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X250X5000

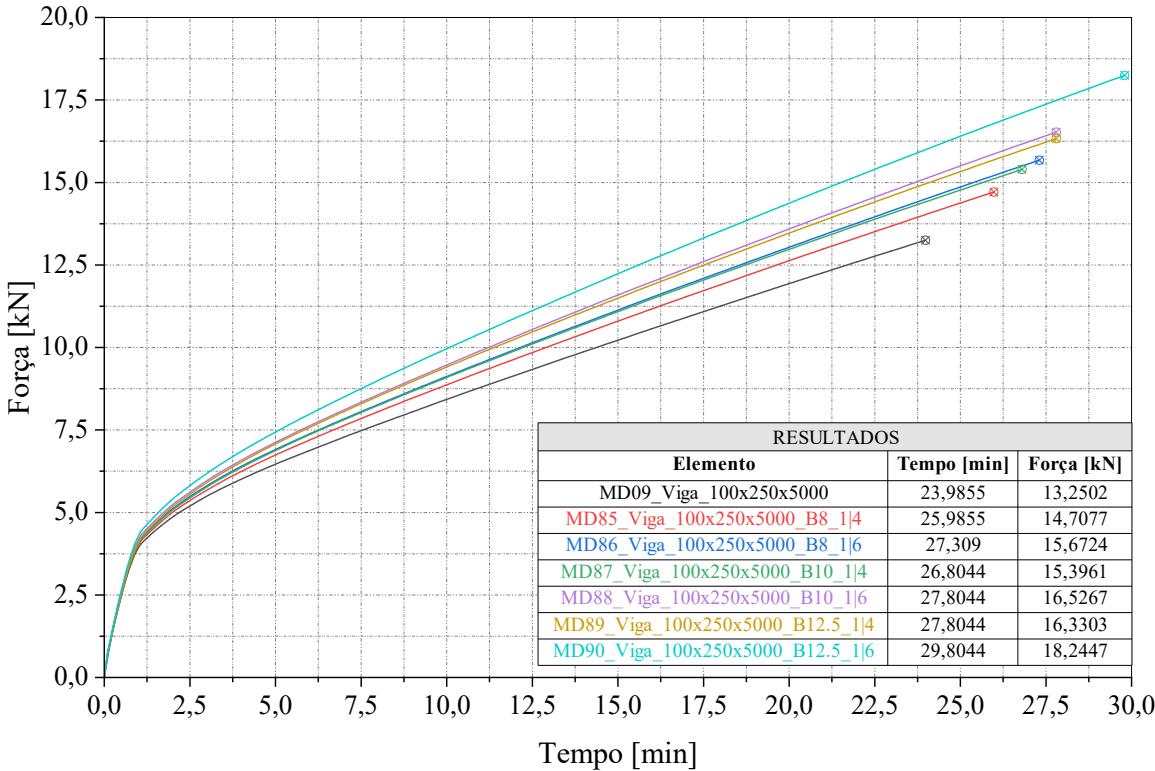
5.9.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 9

O Bloco 9 ([Figura 83](#)) contempla vigas com seção transversal de 100×250 mm e comprimento de 5000 mm, representando os elementos mais esbeltos desta série de análises. A viga de referência, MD09_Viga_100x250x5000, sem reforço metálico, apresentou tempo resistente ao fogo de 23,99 min e força máxima de 13,25 kN, evidenciando a sensibilidade do comportamento estrutural ao aumento do comprimento, sobretudo em situação de degradação térmica progressiva.

A inclusão de barras de aço resultou em incrementos sistemáticos tanto no tempo de exposição ao fogo quanto na capacidade resistente. Os modelos reforçados atingiram tempos entre 25,99 min e 29,80 min, indicando um prolongamento relevante da estabilidade estrutural sob aquecimento. No que se refere à força resistente, os valores máximos evoluíram para a faixa de 14,71 kN a 18,24 kN, demonstrando que o aço passa a desempenhar papel estrutural cada vez mais significativo à medida que a rigidez e a resistência da madeira são reduzidas pela elevação da temperatura.

O desempenho superior foi novamente observado nos modelos com barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas do centro geométrico, com destaque para o modelo MD90, que apresentou os maiores valores simultâneos de tempo e força.

Figura 83 - Resultados gráficos das vigas 100x250x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.9.2 Análise comparativa de resultados do bloco 9

A Tabela 69 a seguir sintetiza os ganhos percentuais de tempo resistente ao fogo e de força máxima obtidos para cada configuração reforçada, tomando como base a viga sem reforço MD09_Viga_100x250x5000.

Tabela 72 - Resultados comparativos das vigas de 100x250x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD09 - Sem reforço	—	—
MD85 - B8 1/4	+8,3%	+11,0%
MD86 - B8 1/6	+13,8%	+18,3%
MD87 - B10 1/4	+11,7%	+16,2%
MD88 - B10 1/6	+15,9%	+24,8%
MD89 - B12,5 1/4	+15,9%	+23,3%
MD90 - B12,5 1/6	+24,2%	+37,7%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.9.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 9

O comportamento observado no Bloco 9 reforça a tendência já identificada nos blocos anteriores, segundo a qual o reforço metálico torna-se progressivamente mais eficiente à medida que o comprimento da viga aumenta. Em elementos mais longos, os efeitos da degradação térmica da madeira são potencializados, o que amplia a importância do aço na manutenção da capacidade resistente e no retardamento do colapso estrutural.

Os resultados evidenciam incrementos de tempo resistente ao fogo de até 24% e ganhos expressivos de força máxima, alcançando quase 38%. Não obstante, também se destaca a influência marcante da posição 1/6, sobretudo para barras de maior diâmetro.

Os ganhos de tempo resistente ao fogo podem ser atribuídos à atuação das barras como elementos de redistribuição de esforços, reduzindo a taxa de evolução das deformações e postergando a formação de mecanismos críticos. Paralelamente, o aumento da força máxima indica que o sistema híbrido apresenta maior reserva resistente, mesmo em estágios avançados de aquecimento.

A superioridade das configurações com barras posicionadas mais afastadas do centro geométrico confirma a relevância do braço de alavanca interno na resistência à flexão em situação de incêndio. Assim, o Bloco 9 consolida a evidência de que a inclusão estratégica de barras de aço embutidas constitui uma solução tecnicamente eficaz para ampliar tanto a capacidade mecânica quanto o tempo de resistência ao fogo de vigas de madeira de maior esbeltez.

5.10 BLOCO 10 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X3000

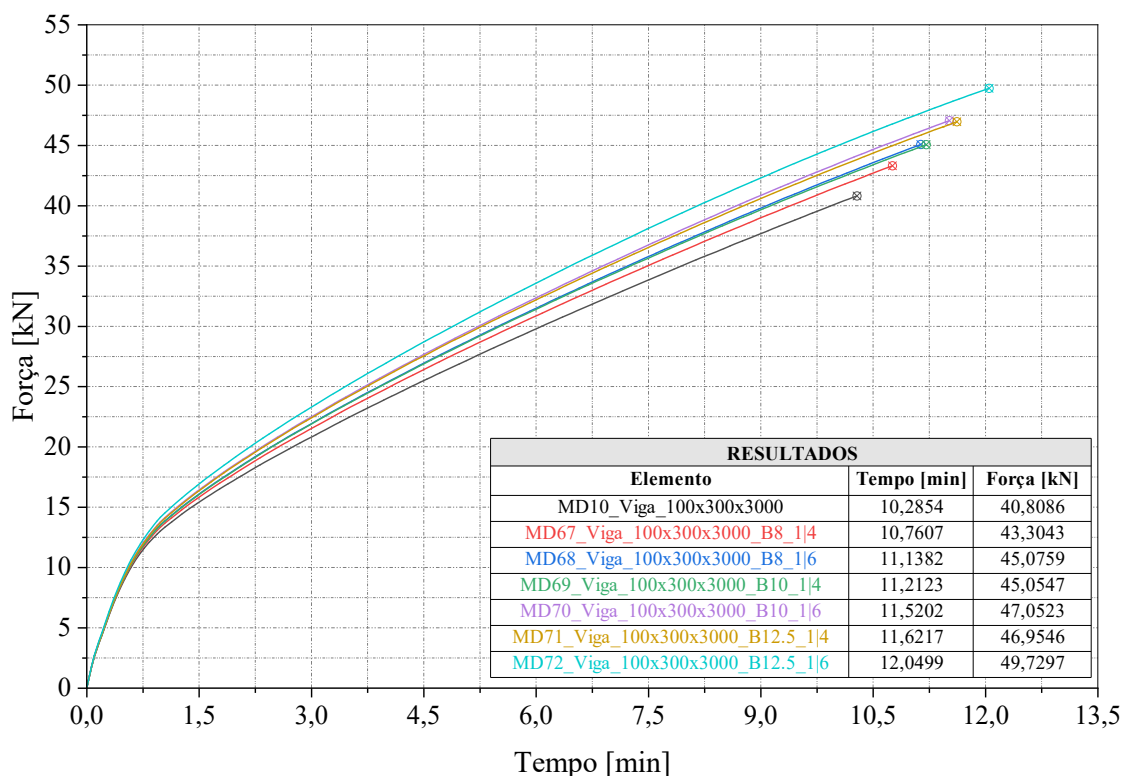
5.10.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 10

O Bloco 10 ([Figura 84](#)) reúne vigas com seção transversal de 100×300 mm e comprimento de 3000 mm, configuração caracterizada por elevada rigidez inicial e maior capacidade resistente quando comparada às seções menos altas. A viga de referência, MD10_Viga_100x300x3000, sem reforço metálico, apresentou tempo resistente ao fogo de 10,29 min e força máxima de 40,81 kN, refletindo um comportamento estrutural robusto em termos de resistência, porém sensível à ação térmica devido à rápida evolução do campo de temperaturas em seções mais espessas.

A introdução de barras de aço resultou em incrementos consistentes tanto no tempo de exposição ao fogo quanto na força resistente. Os modelos reforçados atingiram tempos variando entre 10,76 min e 12,05 min, evidenciando um prolongamento da estabilidade estrutural mesmo em um intervalo temporal relativamente curto. Em termos de força, observou-se uma elevação significativa, com valores máximos entre 43,30 kN e 49,73 kN, indicando que o aço passou a assumir parcela relevante da resistência à flexão à medida que a madeira sofreu degradação térmica.

O desempenho mais elevado foi identificado no modelo MD72, que combinou maior diâmetro das barras com posicionamento mais afastado do centro geométrico, resultando nos maiores ganhos simultâneos de tempo e força.

Figura 84 - Resultados gráficos das vigas 100x300x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.10.2 Análise comparativa de resultados do bloco 10

A Tabela 70 a seguir traz os ganhos percentuais de tempo resistente ao fogo e de força máxima dos modelos reforçados em comparação direta com a viga de referência MD10_Viga_100x300x3000.

Tabela 73 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD10 - Sem reforço	—	—
MD67 - B8 1/4	+4,6%	+6,1%
MD68 - B8 1/6	+8,3%	+10,4%
MD69 - B10 1/4	+9,0%	+10,4%
MD70 - B10 1/6	+12,0%	+15,3%
MD71 - B12,5 1/4	+13,0%	+15,0%
MD72 - B12,5 1/6	+17,1%	+21,8%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.10.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 10

Os resultados obtidos mostram ganhos de tempo resistentes ao fogo em até 17%, mesmo em seções de maior inércia. Para os incrementos de força, os ganhos foram superiores a 20% no modelo mais eficientes (MD72), com influência clara da posição das barras, com vantagens sistemáticas para a configuração 1/6.

O Bloco 10 evidencia que, mesmo em vigas com elevada capacidade resistente inicial, a inclusão de barras de aço contribui para o desempenho termomecânico sob incêndio. O aumento relativamente moderado do tempo resistente ao fogo está associado à rápida evolução térmica típica de seções mais espessas, nas quais a perda de propriedades da madeira ocorre de forma acelerada nas regiões mais solicitadas.

Por outro lado, os ganhos substanciais de força indicam que o aço atua como elemento de compensação estrutural, assumindo esforços crescentes à medida que a rigidez da madeira é reduzida. O posicionamento mais afastado do centro geométrico potencializa esse efeito, uma vez que amplia o braço de alavanca interno e favorece a resistência à flexão em regime termomecânico acoplado.

5.11 BLOCO 11 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X4000

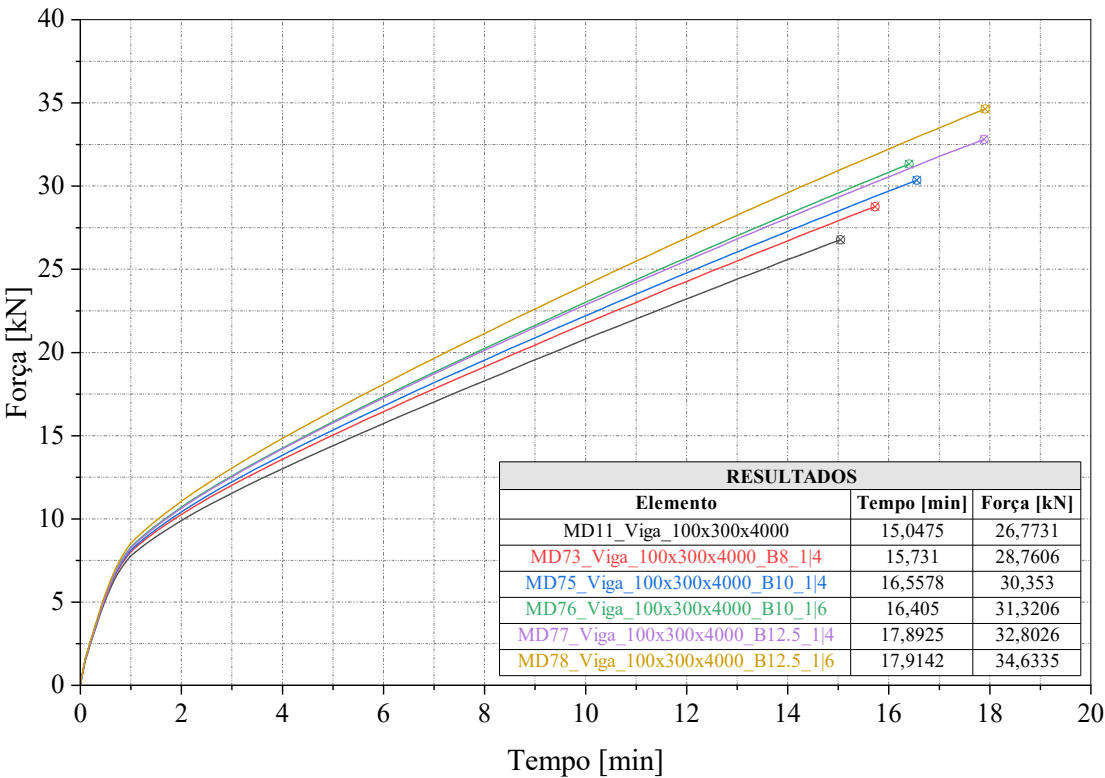
5.11.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 11

O Bloco 11 ([Figura 85](#)) contempla vigas com seção transversal de 100×300 mm e comprimento ampliado para 4000 mm, o que resulta em maior esbeltez estrutural e, consequentemente, em uma sensibilidade mais pronunciada aos efeitos combinados de carregamento mecânico e degradação térmica. A viga de referência, MD11_Viga_100x300x4000, sem qualquer tipo de reforço metálico, apresentou um tempo

resistente ao fogo de 15,05 min e força máxima de 26,77 kN, valores que refletem a redução da capacidade portante associada ao aumento do vão.

A incorporação de barras de aço promoveu melhorias no desempenho global das vigas, tanto em termos de tempo resistente quanto de força máxima. Os modelos reforçados atingiram tempos variando entre 15,73 min e 17,91 min, sugerindo uma extensão gradual da estabilidade estrutural sob exposição ao fogo. Do ponto de vista mecânico, a força resistente máxima evoluiu para a faixa de 28,76 kN a 34,63 kN, indicando que o reforço metálico passou a desempenhar papel relevante na redistribuição dos esforços internos à medida que a madeira perdeu rigidez e resistência. O melhor desempenho do conjunto foi observado no modelo MD78, no qual a combinação de maior diâmetro das barras e posicionamento mais afastado do eixo neutro resultou nos maiores valores simultâneos de tempo e força.

Figura 85 - Resultados gráficos das vigas 100x300x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.11.2 Análise comparativa de resultados do bloco 11

A [Tabela 71](#) sintetiza os ganhos percentuais de tempo resistente ao fogo e de força máxima obtidos pelos modelos reforçados, tomando como referência direta a viga MD11_Viga_100x300x4000.

Tabela 74 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD11 - Sem reforço	—	—
MD73 - B8 1/4	+4,5%	+7,4%
MD75 - B10 1/4	+10,0%	+13,3%
MD76 - B10 1/6	+9,0%	+17,0%
MD77 - B12,5 1/4	+18,9%	+22,5%
MD78 - B12,5 1/6	+19,0%	+29,3%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.11.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 11

Os resultados do Bloco 11 demonstram que o aumento do vão estrutural intensifica a relevância do reforço metálico no comportamento termomecânico das vigas de madeira. Os incrementos de tempo chegaram a 19% e os ganhos de força atingiram 29,3% nos casos mais eficientes.

Os incrementos de tempo resistente ao fogo observados indicam que as barras contribuem para retardar a instabilidade global do elemento, mesmo que a degradação térmica da madeira continue sendo o mecanismo dominante. Em contrapartida, os ganhos substanciais de força evidenciam a eficiência do reforço em assumir esforços crescentes à medida que a seção de madeira perde capacidade portante.

A superioridade das configurações 1/6, associadas a maiores diâmetros de barras, reforça a importância do posicionamento do aço em regiões de maior solicitação à flexão, maximizando o braço de alavanca interno. Dessa forma, o Bloco 11 consolida a conclusão de que o reforço metálico se torna progressivamente mais eficaz à medida que o vão aumenta, configurando uma estratégia estrutural particularmente vantajosa para vigas esbeltas submetidas à ação do fogo.

5.12 BLOCO 12 - VIGAS COM GEOMETRIA 100X300X5000

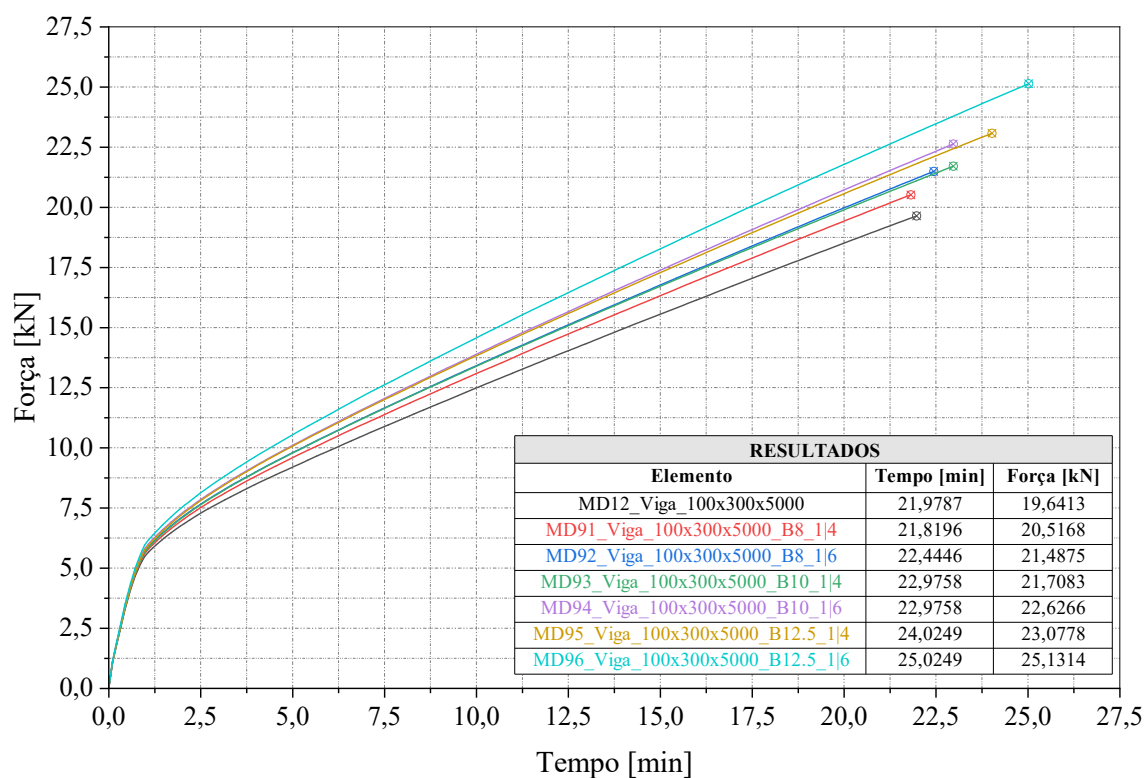
5.12.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 12

O Bloco 12 ([Figura 86](#)) reúne vigas com seção transversal constante de 100×300 mm e comprimento de 5000 mm, caracterizando elementos com elevada esbeltez e maior suscetibilidade aos efeitos combinados de degradação térmica e amplificação dos deslocamentos. A viga de referência MD12_Viga_100x300x5000, sem reforço metálico,

apresentou tempo resistente ao fogo de 21,98 min, associado a uma força máxima de 19,64 kN, evidenciando a redução progressiva da capacidade portante em função do aumento do vão.

A introdução de barras de aço resultou em melhorias graduais e sistemáticas no comportamento estrutural. Os modelos reforçados alcançaram tempos resistentes variando entre 21,82 min e 25,02 min, demonstrando que o reforço contribui para postergar a instabilidade global mesmo em vigas de grande comprimento. Em termos de força máxima, os valores evoluíram para a faixa de 20,52 kN a 25,13 kN, indicando que o aço passou a assumir parcela crescente dos esforços à medida que a madeira sofria perda de rigidez devido à elevação da temperatura. Em termos de desempenho, o modelo MD96 apresentou os melhores resultados.

Figura 86 - Resultados gráficos das vigas 100x300x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.12.2 Análise comparativa de resultados do bloco 12

A seguir, a [Tabela 72](#) resume os resultados percentuais de tempo resistente ao fogo e de força máxima, considerando a viga MD12_Viga_100x300x5000 como referência.

Tabela 75 - Resultados comparativos das vigas de 100x300x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD12 - Sem reforço	—	—
MD91 - B8 1/4	-0,7%	+4,5%
MD92 - B8 1/6	+2,1%	+9,4%
MD93 - B10 1/4	+4,6%	+10,5%
MD94 - B10 1/6	+4,6%	+15,2%
MD95 - B12,5 1/4	+9,3%	+17,5%
MD96 - B12,5 1/6	+13,9%	+28,0%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.12.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 12

Os resultados do Bloco 12 reforçam a tendência observada nos blocos anteriores, segundo a qual o aumento do vão estrutural intensifica a importância do reforço metálico no comportamento em situação de incêndio. Em vigas de 5000 mm, a perda de capacidade da madeira ocorre de forma mais acentuada, tanto pela degradação térmica quanto pela amplificação dos efeitos de segunda ordem, o que torna o papel do aço ainda mais relevante.

O ganho relativamente moderado no tempo resistente ao fogo (máximo de 13,9%) indica que, para vãos muito elevados, o colapso global passa a ser governado por instabilidade geométrica, limitando a extensão temporal proporcionada pelo reforço. Por outro lado, os ganhos substanciais de força máxima (máximo de 28%) evidenciam que as barras de aço são altamente eficientes na redistribuição dos esforços internos, assumindo papel estrutural predominante nas fases mais avançadas do aquecimento.

A superioridade das configurações 1/6, associadas a maiores diâmetros de barras, confirma que o posicionamento do aço em regiões de maior solicitação à flexão é determinante para maximizar o desempenho estrutural.

5.13 BLOCO 13 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X3000

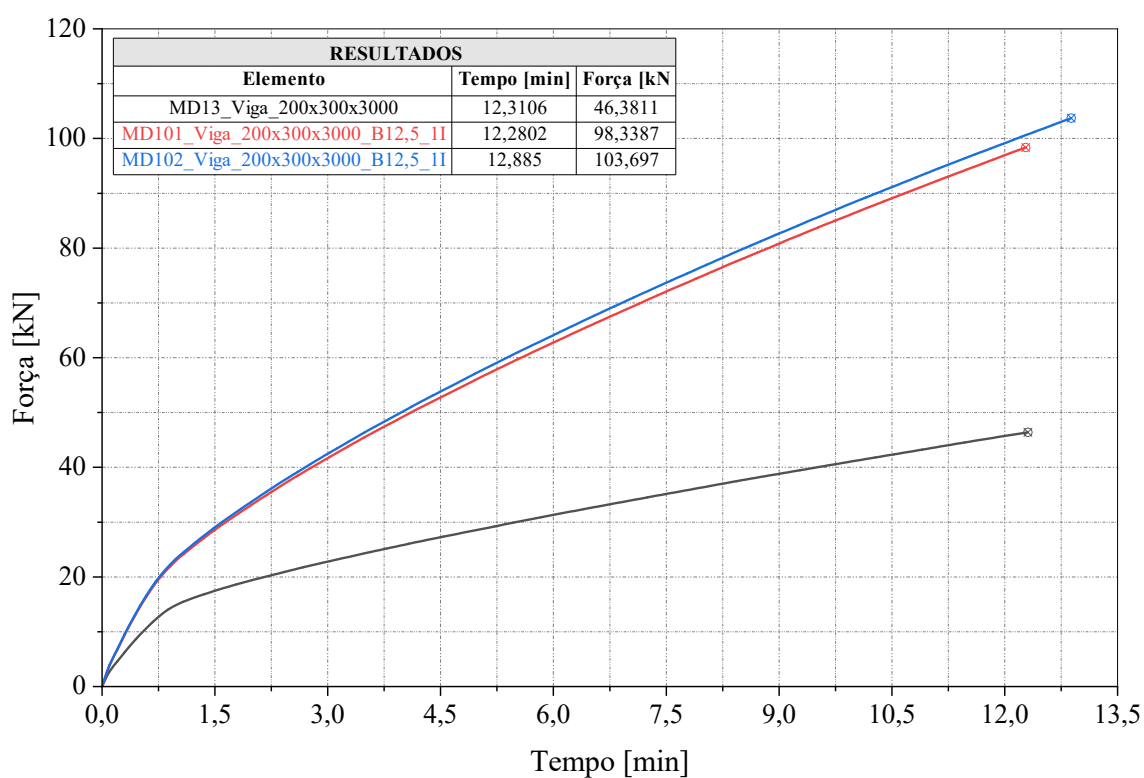
5.13.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 13

O Bloco 13 ([Figura 87](#)) contempla vigas com seção transversal ampliada de 200×300 mm e comprimento de 3000 mm, representando elementos com maior inércia à flexão quando comparados aos blocos anteriores. A viga sem reforço metálico MD13_Viga_200x300x3000 apresentou um tempo resistente ao fogo de 12,31 min, associado a uma força máxima de 46,38

kN, demonstrando que, embora a seção seja mais robusta, a degradação térmica da madeira ainda limita significativamente a capacidade portante em situação de incêndio.

A introdução de barras de aço de 12,5 mm promoveu uma alteração substancial no comportamento global do sistema. Os modelos reforçados MD101 e MD102 atingiram tempos resistentes muito próximos ao da viga de referência, variando entre 12,28 min e 12,89 min, o que indica que, para essa geometria, o reforço não altera de forma expressiva o instante de colapso térmico. Em contrapartida, a capacidade resistente foi drasticamente ampliada, com forças máximas da ordem de 98,34 kN e 103,70 kN, respectivamente.

Figura 87 - Resultados gráficos das vigas 200x300x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.13.2 Análise comparativa de resultados do bloco 13

A comparação direta entre a viga sem reforço (MD13) e as configurações reforçadas (Tabela 73) evidencia o papel predominante do aço na sustentação das cargas, especialmente após a perda progressiva das propriedades mecânicas da madeira.

Tabela 76 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD13 - Sem reforço	—	—
MD101 - B12,5 1/4	-0,2%	+112,0%
MD102 - B12,5 1/6	+4,7%	+123,6%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.13.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 13

O tempo resistente ao fogo permanece praticamente inalterado com a introdução do reforço. Já os ganhos de força ultrapassam 100%, caracterizando uma duplicação da capacidade portante. Em relação às configurações, a posição 1/6 apresenta desempenho ligeiramente superior à 1/4, confirmando a influência das posições geométricas do aço no desempenho dos elementos estruturais.

Os resultados deste bloco sugerem que, para vigas com seção transversal elevada e vão intermediário, o colapso em situação de incêndio é governado pela degradação térmica, o que explica a limitada variação do tempo resistente ao fogo entre os modelos. Nessa condição, o reforço metálico atua predominantemente como elemento de aumento da capacidade portante, sem retardar significativamente o instante de perda de estabilidade.

A expressiva elevação da força máxima suportada pelas vigas reforçadas demonstra que as barras de aço assumem parcela substancial dos esforços internos à medida que a madeira carboniza. Esse efeito é particularmente relevante em aplicações nas quais a manutenção da capacidade resistente residual é um requisito de segurança, mesmo que o tempo de resistência ao fogo não seja significativamente ampliado.

Dessa forma, em vigas de maior seção, o reforço metálico embutido constitui uma estratégia altamente eficiente para ampliação da resistência mecânica sob incêndio, ainda que seu impacto sobre o tempo resistente permaneça limitado pela cinética de degradação térmica da madeira.

5.14 BLOCO 14 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X4000

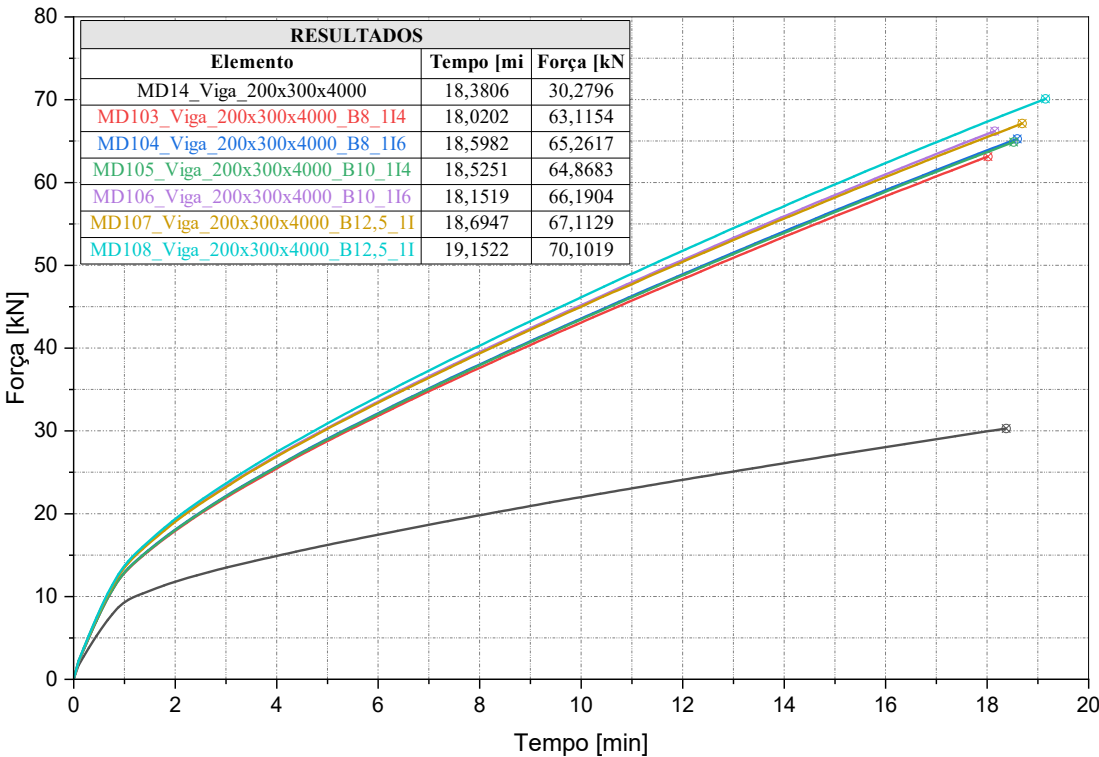
5.14.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 14

O Bloco 14 ([Figura 88](#)) reúne vigas com seção 200×300 mm e comprimento aumentado para 4000 mm, o que implica maior esbeltez e, consequentemente, maior sensibilidade à

degradação das propriedades mecânicas durante a exposição ao fogo. A viga de referência sem reforço MD14_Viga_200x300x4000 apresentou tempo resistente de 18,38 min, associado a uma força máxima de 30,28 kN, valor significativamente inferior ao observado para as vigas reforçadas, evidenciando a limitação estrutural imposta exclusivamente pela madeira carbonizada.

A inserção de barras de aço, independentemente do diâmetro e da posição, resultou em curvas força-tempo substancialmente superiores, com comportamento praticamente paralelo entre si após os instantes iniciais de aquecimento. Isso indica que, uma vez estabelecido o regime térmico, a contribuição do aço passa a dominar a capacidade resistente global do elemento.

Figura 88 - Resultados gráficos das vigas 200x300x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.14.2 Análise comparativa de resultados do bloco 14

A comparação com a viga sem reforço (MD14) e as configurações reforçadas (Tabela 74) evidencia o papel predominante do aço na sustentação das cargas, especialmente após a perda progressiva das propriedades mecânicas da madeira.

Tabela 77 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD14 - Sem reforço	-	-
MD103 – B8 1/4	-1,95%	+108,4%
MD104 – B8 1/6	+1,15%	+115,5%
MD105 – B10 1/4	+0,7%	+114,2%
MD106 – B10 1/6	-1,25%	+118,6%
MD107 - B12,5 1/4	+1,68%	+121,6%
MD108 - B12,5 1/6	+4,18%	+131,5%

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.14.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 14

A diferença de desempenho entre a viga MD14 e os modelos reforçados é particularmente expressiva neste bloco. Enquanto a viga sem aço apresenta uma evolução força-tempo limitada, com crescimento moderado até o colapso, as vigas reforçadas mantêm um incremento quase linear da força ao longo do tempo, mesmo sob exposição contínua ao fogo.

Esse contraste reforça a interpretação de que, para vigas de maior vão, o reforço metálico embutido não apenas aumenta a capacidade resistente final, mas também contribui para uma resposta estrutural mais estável ao longo do aquecimento, reduzindo a taxa de perda de rigidez global.

Os resultados evidenciam que, em vigas de 200×300 mm com 4,0 m de comprimento, a presença de armaduras de aço embutidas é determinante para a manutenção da capacidade portante em situação de incêndio. Embora os ganhos em tempo resistente sejam relativamente modestos nos melhores modelos, os incrementos de força são expressivos e crescentes com o aumento do diâmetro das barras.

Assim, o Bloco 14 também denota que, para elementos mais esbeltos, o reforço metálico atua como mecanismo fundamental de redistribuição de esforços durante o incêndio ampliando significativamente os ganhos de rigidez estrutural.

5.15 BLOCO 15 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X300X5000

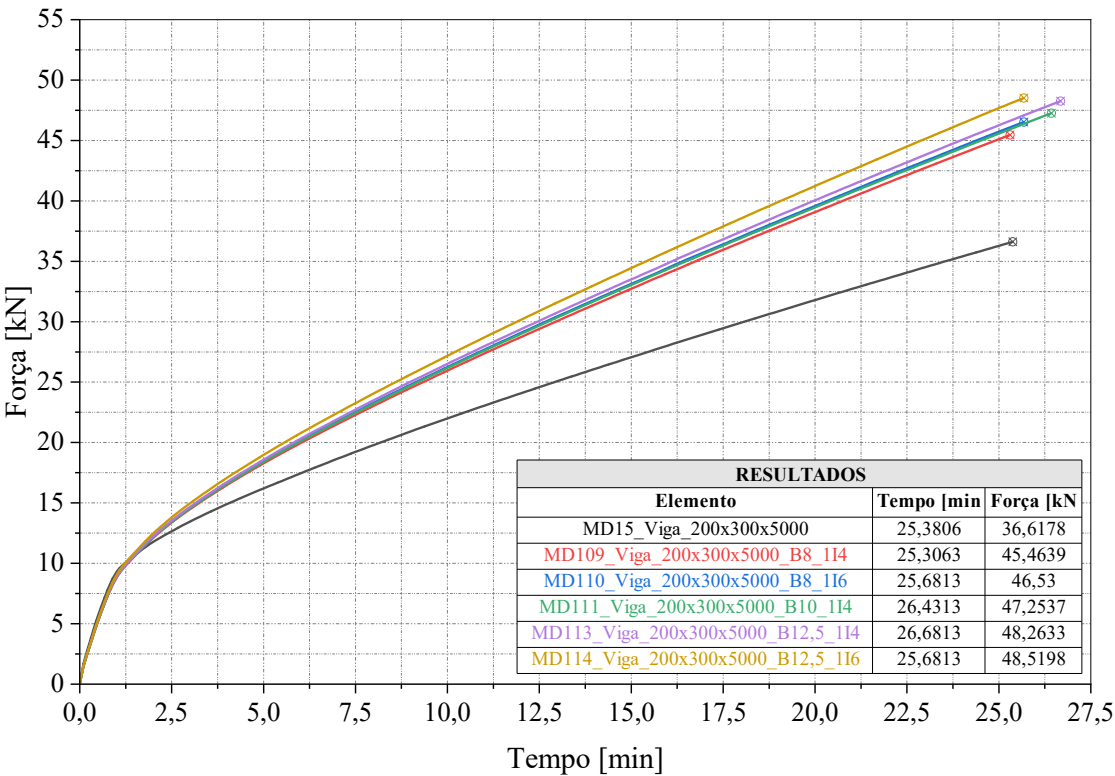
5.15.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 15

O Bloco 15 ([Figura 89](#)) contempla vigas com seção transversal 200×300 mm e comprimento ampliado para 5000 mm, condição que intensifica os efeitos da exposição térmica devido ao maior vão e à consequente redução da rigidez global. A viga de referência sem reforço

MD14_Viga_200x300x5000 apresentou um tempo resistente de 25,38 min, associado a uma força máxima de 36,62 kN, caracterizando um desempenho limitado frente às solicitações termomecânicas impostas.

Em contraste, todas as vigas reforçadas exibiram curvas força–tempo posicionadas acima da referência ao longo de todo o histórico de análise, evidenciando que a inclusão das barras de aço promove uma elevação da capacidade portante, sem alterações substanciais em relação ao tempo.

Figura 89 - Resultados gráficos das vigas 200x300x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.15.2 Análise comparativa de resultados do bloco 15

A [Tabela 75](#) denota os ganhos percentuais de tempo e força em relação à viga sem reforço. A análise comparativa demonstra que os maiores ganhos estão associados, sobretudo, ao aumento da força resistente. O desempenho mais expressivo foi observado nos modelos com barras de 12,5 mm quando comparado ao modelo sem reforço MD14.

Tabela 78 - Resultados comparativos das vigas de 200x300x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD15 - Sem reforço	—	—
MD109 - B8 1/4	-0,29 %	+24,17 %
MD110 - B8 1/6	+1,19 %	+27,10 %
MD111 - B10 1/4	+4,14 %	+29,09 %
MD113 - B12,5 1/4	+5,13 %	+31,85 %
MD114 - B12,5 1/6	+1,19 %	+32,55 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.15.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 15

A comparação entre as configurações 1/4 e 1/6 revela diferenças sutis, porém consistentes. De modo geral, as vigas com armaduras posicionadas em 1/6 apresentaram forças ligeiramente superiores, especialmente nos modelos com maior diâmetro de barra. Esse comportamento sugere que a maior distância das armaduras em relação ao centro geométrico contribui para um braço de alavanca mais favorável, potencializando a participação do aço no equilíbrio interno da seção.

No que se refere ao tempo resistente, as variações entre as posições foram pequenas, reforçando a interpretação de que o posicionamento das barras influencia mais intensamente a capacidade mecânica residual do que o ritmo de degradação térmica global para vigas com seções transversais maiores. Por fim, este bloco sugere que, para elementos mais longos, o aço atua unicamente como mecanismo de sustentação mecânica residual, retardando o colapso estrutural associado à perda de resistência da madeira em função da capacidade portante.

5.16 BLOCO 16 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X3000

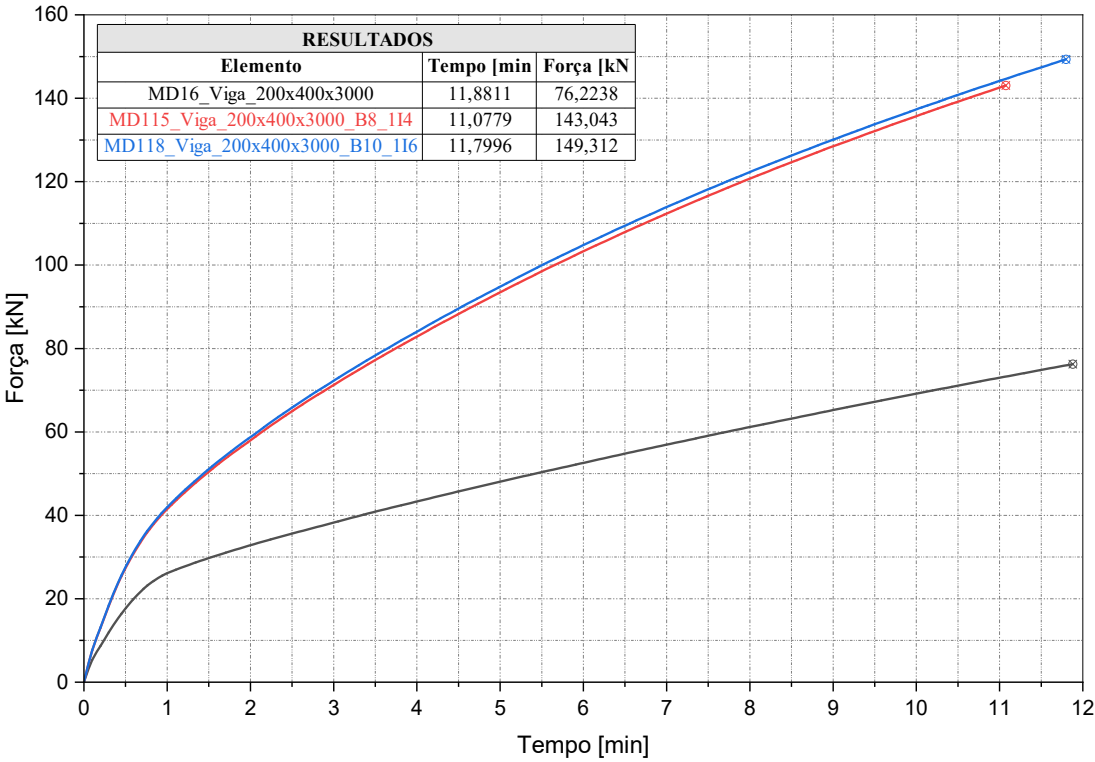
5.16.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 16

O Bloco 16 ([Figura 90](#)) é caracterizado por vigas de seção 200×400 mm e comprimento 3000 mm, o que resulta em uma elevada capacidade resistente inicial quando comparado aos blocos com seções mais esbeltas. Em situação de incêndio, a viga sem reforço apresenta comportamento típico de degradação progressiva da rigidez e da resistência, atingindo força máxima de 76,22 kN em aproximadamente 11,88 minutos.

A introdução de barras de aço embutidas promove uma alteração significativa no comportamento termomecânico global. As curvas de força *versus* tempo das vigas reforçadas

mantêm inclinação elevada ao longo de todo o aquecimento, indicando que o aço passa a assumir parcela crescente dos esforços à medida que a madeira sofre redução de propriedades mecânicas. O resultado é um aumento substancial da força resistente, mesmo sem variações relevantes no tempo total de exposição ao fogo.

Figura 90 - Resultados gráficos das vigas 200x400x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.16.2 Análise comparativa de resultados do bloco 16

A comparação quantitativa entre a viga sem reforço e as vigas reforçadas, como os respectivos ganhos percentuais de tempo e força são elencados na [Tabela 76](#).

Tabela 79 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD16 - Sem reforço	—	—
MD115 - B8 1/4	−6,76 %	+87,65 %
MD118 - B10 1/6	−0,69 %	+95,90 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.16.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 16

Os resultados do Bloco 16 mostram de forma clara que, para seções de grande inércia, o efeito dominante do reforço metálico em situação de incêndio está associado ao aumento da capacidade resistente, e não necessariamente à extensão do tempo até o colapso.

A redução observada no tempo resistente da viga MD115 pode ser atribuída à maior concentração de tensões térmicas e à antecipação de mecanismos de instabilidade local, decorrentes da interação entre aço e madeira sob gradientes térmicos elevados. Ainda assim, essa redução temporal é amplamente compensada pelo expressivo ganho de força, que praticamente dobra em relação à viga sem reforço.

No caso da viga MD118, o aumento do diâmetro e o posicionamento mais afastado da linha neutra resultam em um comportamento mais equilibrado, com tempo praticamente equivalente ao da viga de referência e ganho de força próximo a 96%. Isso indica que a combinação entre diâmetro maior e posicionamento adequado do reforço contribui para uma melhor redistribuição de esforços durante o incêndio.

De forma geral, o Bloco 16 confirma que, em vigas robustas, a inclusão de barras de aço embutidas é altamente eficiente para elevar a capacidade portante residual sob fogo, mesmo quando os ganhos em tempo são limitados.

5.17 BLOCO 17 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X4000

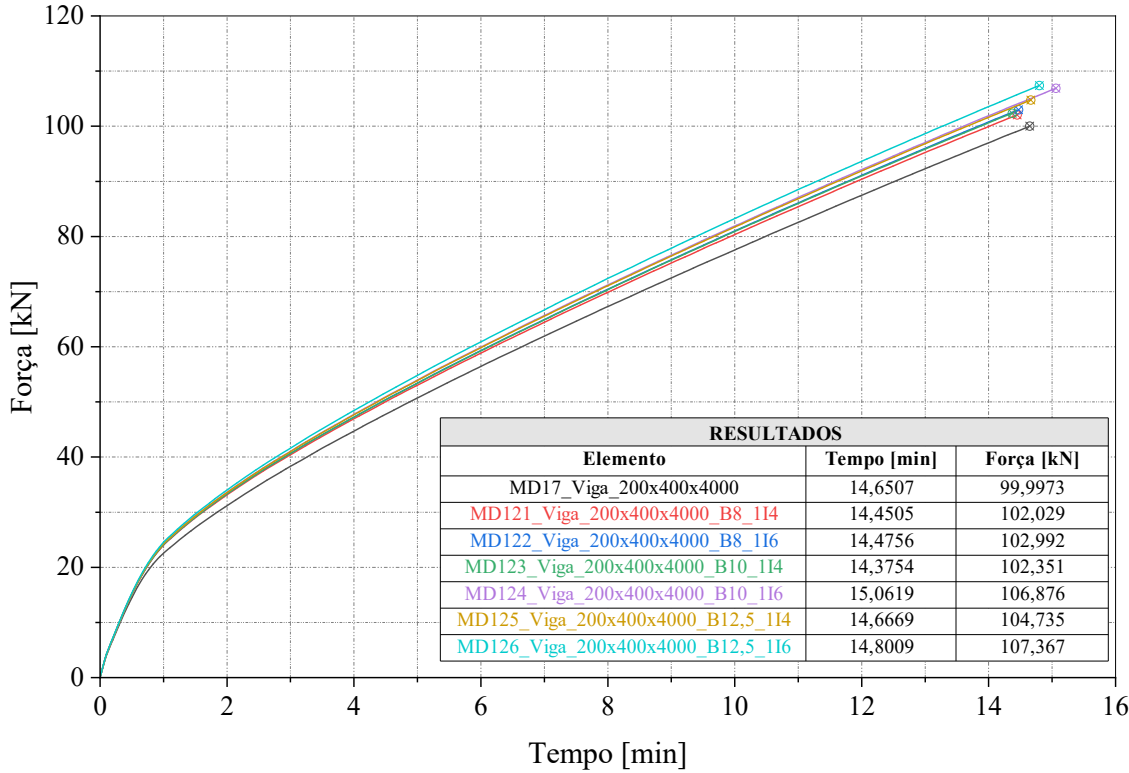
5.17.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 17

O Bloco 17 ([Figura 91](#)) contempla vigas com seção transversal 200×400 mm e comprimento ampliado para 4000 mm, o que implica aumento da esbelteza em relação à viga de referência. Em situação de incêndio, a viga sem reforço MD17_Viga_200x400x4000 apresenta capacidade resistente máxima da ordem de 100,0 kN, atingida em aproximadamente 14,65 minutos, refletindo um equilíbrio entre a maior exposição térmica ao longo do comprimento e a elevada inércia da seção.

A inserção de barras de aço embutidas resulta em um comportamento estrutural mais robusto ao longo de todo o processo de aquecimento. As curvas força-tempo das vigas reforçadas mantêm-se sistematicamente acima da curva da viga sem reforço, indicando que o aço passa a desempenhar papel fundamental na sustentação dos esforços à medida que a madeira sofre degradação térmica progressiva. Observa-se, ainda, que o comprimento maior

não impede ganhos consistentes de resistência, evidenciando a eficácia do reforço mesmo em elementos mais esbeltos.

Figura 91 - Resultados gráficos das vigas 200x400x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.17.2 Análise comparativa de resultados do bloco 17

A Tabela 77 a seguir denota a comparação dos resultados entre as vigas do Bloco 17 e a viga de referência MD16.

Tabela 80 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD17 - Sem reforço	—	—
MD121 - B8 1/4	−1,37%	+2,03 %
MD122 - B8 1/6	−1,20 %	+2,99 %
MD123 - B10 1/4	−1,88 %	+2,35 %
MD124 - B10 1/6	+2,81 %	+6,88 %
MD125 - B12,5 1/4	+0,11 %	+4,74 %
MD126 - B12,5 1/6	+1,03 %	+7,37 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.17.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 17

Os resultados deste bloco evidenciam que o aumento do comprimento da viga, quando associado a uma seção transversal robusta, contribui de forma relevante para o aumento do tempo de resistência ao fogo, mesmo sem a presença de reforço metálico. Em comparação com a viga de referência, a viga sem reforço apresenta acréscimo superior a 23% no tempo resistente, indicando que a redistribuição de esforços ao longo de um elemento mais longo pode retardar o colapso global.

A introdução de barras de aço embutidas potencializa ainda mais esse desempenho, sobretudo no que se refere à capacidade resistente. Os ganhos de força variam entre aproximadamente 34% e 41%, sendo mais expressivos para configurações com barras de maior diâmetro e posicionadas mais afastadas da linha neutra (casos B10 e B12,5 com arranjo 1/6). Essas configurações favorecem a mobilização do aço em flexão, compensando de maneira eficiente a perda de resistência da madeira sob altas temperaturas.

Do ponto de vista do tempo de resistência, observa-se que os reforços não promovem aumentos tão pronunciados quanto os ganhos de força, mas mantêm ou ampliam levemente o desempenho da viga sem reforço. Em particular, a viga MD124 destaca-se por apresentar simultaneamente o maior tempo resistente e um dos maiores valores de força máxima, configurando-se como a solução mais equilibrada.

5.18 BLOCO 18 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X400X5000

5.18.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 18

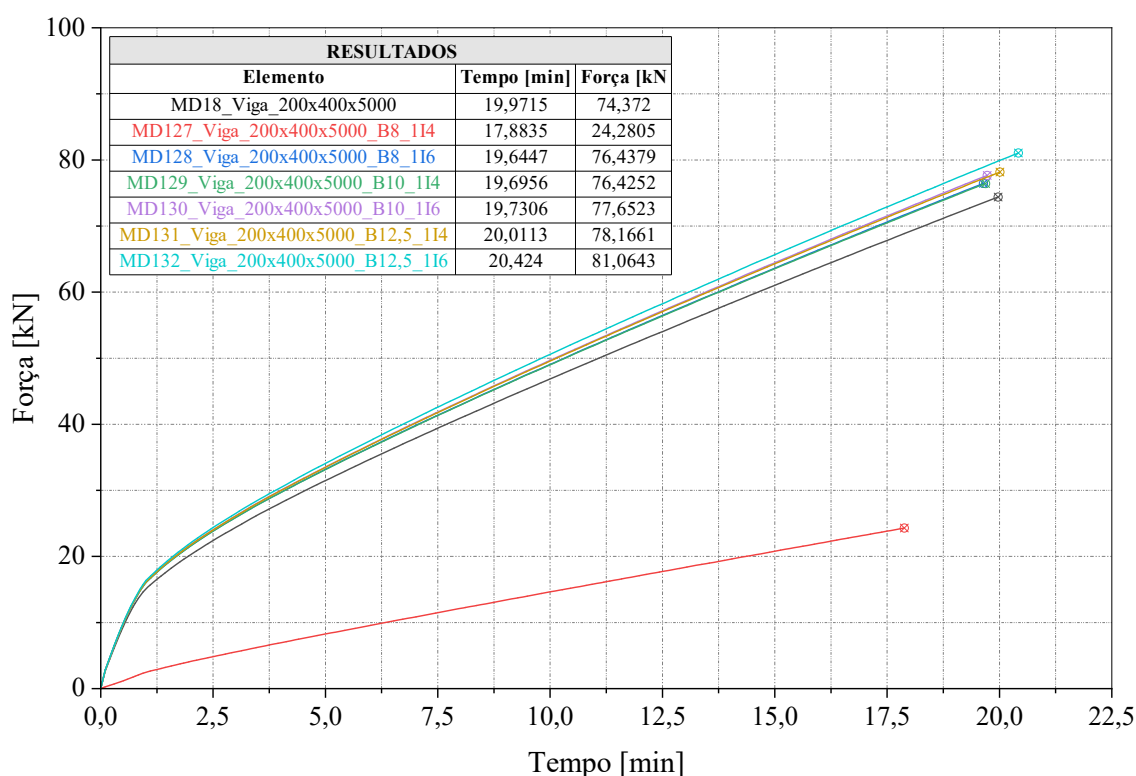
O Bloco 18 ([Figura 92](#)) avalia vigas com seção 200×400 mm e comprimento elevado para 5000 mm, o que intensifica os efeitos de esbeltez e amplia a área exposta à ação térmica. A viga sem reforço MD18_Viga_200x400x5000 apresenta tempo resistente próximo de 20 minutos, com força máxima da ordem de 74,4 kN, caracterizando um comportamento compatível com a maior perda de rigidez associada ao aumento do vão.

De modo geral, as vigas reforçadas mantêm curvas força–tempo superiores à viga de referência ao longo de praticamente todo o processo de aquecimento, indicando contribuição efetiva das barras de aço embutidas na sustentação da capacidade resistente. Destaca-se, contudo, um comportamento atípico da viga MD127, que apresenta queda abrupta de

desempenho, com força máxima significativamente inferior às demais configurações, sugerindo ativação prematura de mecanismos locais de falha ou ineficiência do arranjo de reforço adotado.

As demais configurações reforçadas exibem respostas bastante próximas entre si, com incrementos moderados de força e manutenção ou leve ampliação do tempo resistente, evidenciando que, para vigas mais longas, o reforço metálico atua principalmente na estabilização da capacidade portante residual.

Figura 92 - Resultados gráficos das vigas 200x400x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.18.2 Análise comparativa de resultados do bloco 18

A Tabela 78 a seguir apresenta a comparação quantitativa entre as vigas do Bloco 18 e a viga de referência MD18, considerando variações percentuais de tempo resistente e força máxima. Para o caso deste bloco, as configurações denotam que o reforço metálico atua como um mecanismo capaz de aumentar a rigidez estrutural suportando maiores níveis de força devido a inclusão de reforços metálicos quando comparados à viga sem reforço. Já em relação ao aumento do tempo requerido ao fogo, os reforços não produziram efeitos significativos.

Tabela 81 - Resultados comparativos das vigas de 200x400x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD18 - Sem reforço	—	—
MD127 - B8 1/4	−10,46 %	−67,35 %
MD128 - B8 1/6	−1,64 %	+2,78 %
MD129 - B10 1/4	−1,38 %	+2,77 %
MD130 - B10 1/6	−1,20 %	+4,42 %
MD131 - B12,5 1/4	+0,20 %	+5,09 %
MD132 - B12,5 1/6	+2,26 %	+9,00 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.18.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 18

Os resultados do Bloco 18 indicam que, para vigas com comprimento de 5000 mm, o ganho proporcionado pelo reforço metálico embutido torna-se mais discreto quando comparado a blocos com menores vãos. O aumento da esbelteza faz com que a resposta global seja fortemente governada pela perda de rigidez da madeira sob altas temperaturas, limitando os incrementos possíveis de capacidade resistente.

Ainda assim, observa-se uma tendência clara de melhoria progressiva do desempenho à medida que se aumenta o diâmetro das barras e se adota um arranjo mais favorável. As vigas MD131 e MD132 destacam-se por apresentar simultaneamente manutenção ou ligeiro aumento do tempo resistente e ganhos de força que alcançam até 9%, configurando as soluções mais eficientes do bloco.

O comportamento anômalo da viga MD127, com redução expressiva tanto de tempo quanto de força, sugere que arranjos com barras de menor diâmetro e posicionamento menos favorável podem não apenas ser ineficazes, mas também prejudicar o desempenho global, possivelmente em função de concentrações de tensão, instabilidades locais ou falhas prematuras na interface madeira-aço sob ação térmica.

Em síntese, o Bloco 18 demonstra que, em vigas de grande vão submetidas ao incêndio, o reforço metálico embutido apresenta eficiência limitada, sendo recomendável a adoção de barras de maior diâmetro e configurações geométricas mais eficientes para que se obtenham ganhos mensuráveis de capacidade portante e estabilidade estrutural.

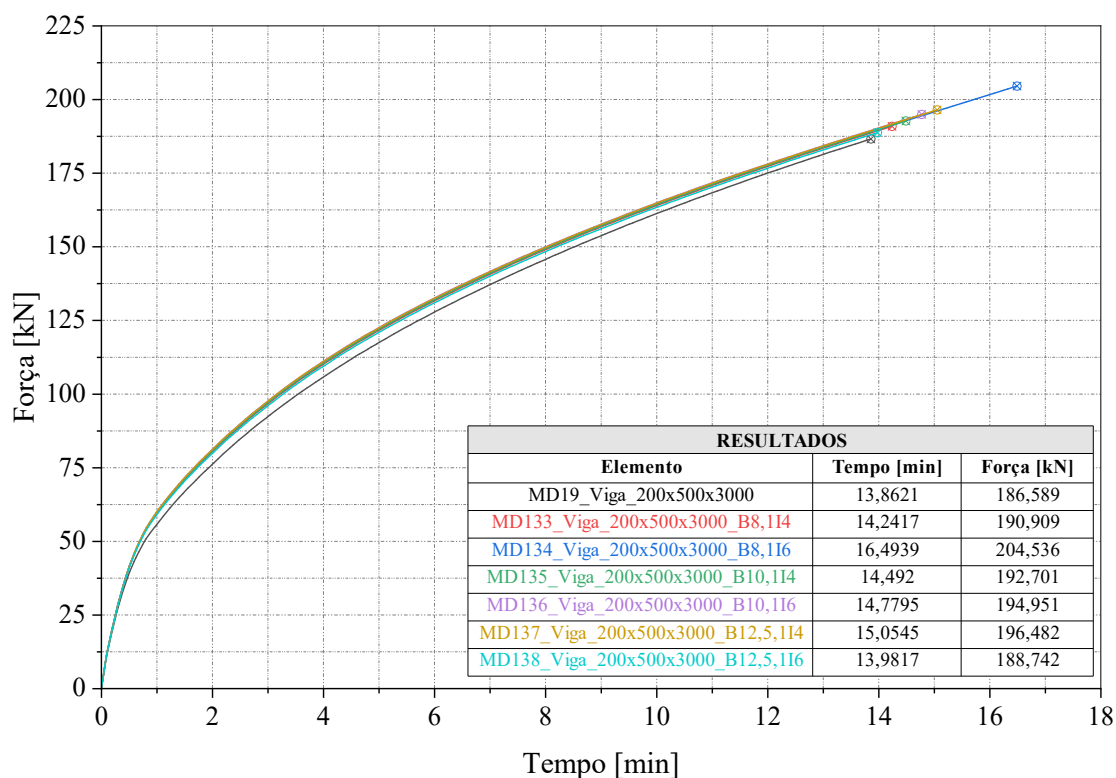
5.19 BLOCO 19 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X3000

5.19.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 19

O Bloco 19 (Figura 93) contempla vigas com seção transversal ampliada (200×500 mm) e comprimento relativamente reduzido (3000 mm), configuração que resulta em elevada capacidade resistente inicial e maior inércia térmica quando comparada aos blocos com menores alturas. A viga de referência MD19_Viga_200x500x3000 apresenta tempo resistente de aproximadamente 13,9 minutos e força máxima próxima de 186,6 kN, evidenciando um comportamento estrutural robusto mesmo sem reforço metálico.

A introdução de barras de aço embutidas promove, de modo geral, aumento da força resistente máxima e, em alguns casos, ampliação significativa do tempo até a perda de capacidade portante. As curvas de força *versus* tempo das vigas reforçadas permanecem sistematicamente acima da viga de referência, indicando participação efetiva do aço na redistribuição de esforços e na manutenção da rigidez global sob ação térmica.

Figura 93 - Resultados gráficos das vigas 200x500x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

Observa-se ainda que as configurações com barras de maior diâmetro e arranjos mais eficientes apresentam não apenas ganhos de força, mas também prolongamento sensível do tempo resistente, destacando-se a viga MD134, que atinge o maior tempo de resistência ao fogo entre todas as configurações do bloco.

5.19.2 Análise comparativa de resultados do bloco 19

A [Tabela 79](#) a seguir apresenta a comparação quantitativa entre as vigas do Bloco 19 e a viga de referência MD19_Viga_200x500x3000, considerando os ganhos percentuais de tempo resistente e força máxima.

Tabela 82 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD19 - Sem reforço	–	–
MD133 - B8 1/4	+2,74 %	+2,31 %
MD134 - B8 1/6	+18,99 %	+9,60 %
MD135 - B10 1/4	+4,55 %	+3,29 %
MD136 - B10 1/6	+6,62 %	+4,50 %
MD137 - B12,5 1/4	+8,61 %	+5,32 %
MD138 - B12,5 1/6	+0,86 %	+1,15 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.19.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 19

Os resultados do Bloco 19 evidenciam que o aumento da altura da seção transversal exerce influência decisiva no desempenho estrutural em situação de incêndio. A maior massa de madeira contribui para retardar o avanço da frente de carbonização e para preservar, por mais tempo, o núcleo resistente da seção, o que explica os elevados níveis de força observados mesmo na viga sem reforço.

A incorporação de barras de aço embutidas potencializa esse comportamento, sobretudo quando associada a arranjos mais eficientes. Nesse contexto, a viga MD134 destaca-se como a solução de melhor desempenho global, apresentando incremento próximo de 19% no tempo resistente e quase 10% na força máxima, demonstrando uma sinergia favorável entre a elevada inércia da seção e a contribuição do aço.

Por outro lado, observa-se que nem todas as combinações de diâmetro e posicionamento resultam em ganhos expressivos. A viga MD138, por exemplo, apresenta incrementos marginais de tempo e força, sugerindo que, para seções já bastante robustas, a eficiência do

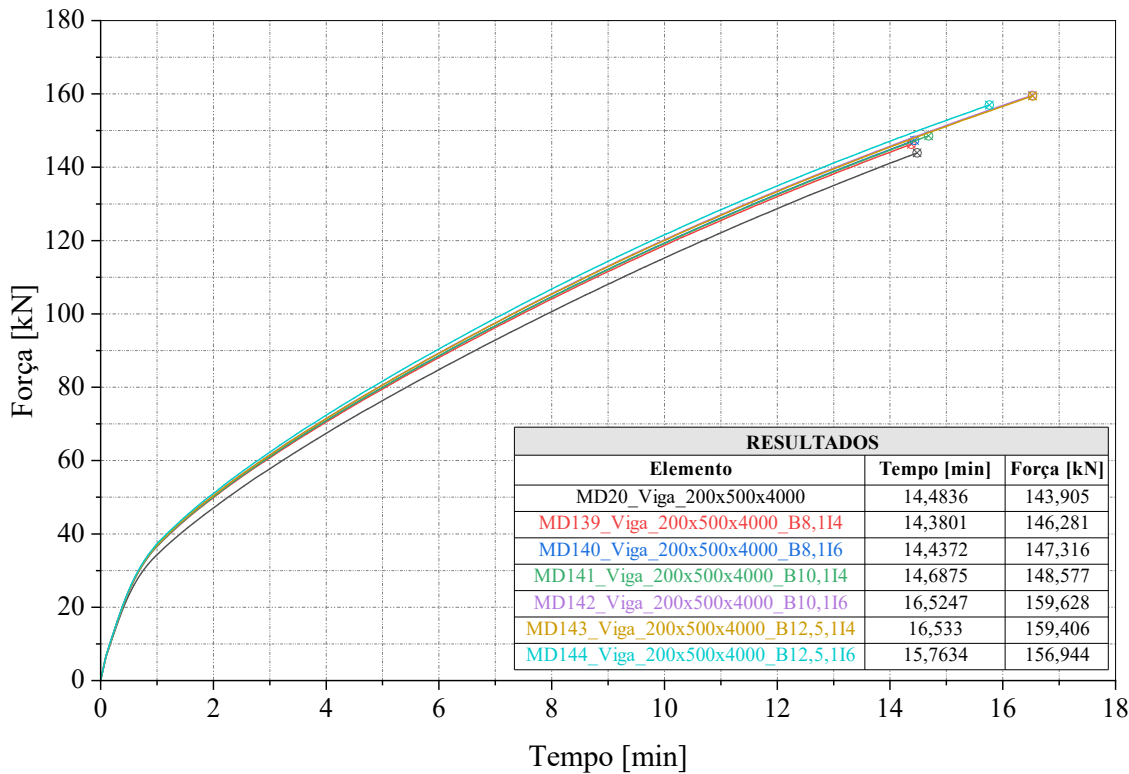
reforço passa a depender fortemente da sua posição relativa em relação às zonas mais solicitadas da seção durante o incêndio.

5.20 BLOCO 20 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X4000

5.20.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 20

O Bloco 20 (Figura 94) reúne vigas com seção transversal 200×500 mm e vão de 4000 mm, combinação que resulta em um equilíbrio entre elevada capacidade resistente e maior solicitação global quando comparada às vigas de menor comprimento. A viga de referência MD20_Viga_200x500x4000 apresenta tempo resistente da ordem de 14,5 minutos e força máxima próxima de 144 kN, evidenciando desempenho satisfatório frente à ação térmica, ainda que inferior ao observado em vigas mais curtas com a mesma seção.

Figura 94 - Resultados gráficos das vigas 200x500x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A introdução de barras de aço embutidas promove aumento consistente tanto da força resistente quanto do tempo até a perda de capacidade portante. As curvas de força *versus* tempo

das vigas reforçadas mantêm-se acima da curva da viga de referência durante praticamente todo o histórico de aquecimento, indicando contribuição efetiva do aço na redistribuição de esforços e no retardo do colapso estrutural.

Destaca-se que as configurações com maior taxa de armadura e arranjos mais eficientes (especialmente as do tipo 1/6) apresentam ganhos expressivos, aproximando o desempenho dessas vigas do comportamento observado em elementos de menor vão, mesmo sob condições severas de incêndio.

5.20.2 Análise comparativa de resultados do bloco 20

A [Tabela 80](#) a seguir apresenta a comparação quantitativa entre as vigas do Bloco 20 e a viga de referência MD20_Viga_200x500x4000, considerando os ganhos percentuais de tempo resistente e de força máxima.

Tabela 83 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD20 - Sem reforço	–	–
MD139 - B8 1/4	–0,71 %	+1,65 %
MD140 - B8 1/6	–0,32 %	+2,37 %
MD141 - B10 1/4	+1,41 %	+3,25 %
MD142 - B10 1/6	+14,10 %	+10,92 %
MD143 - B12,5 1/4	+14,15 %	+10,77 %
MD144 - B12,5 1/6	+8,83 %	+9,07 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.20.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 20

Os resultados do Bloco 20 evidenciam que, para vigas com seção elevada e vão intermediário, a simples introdução de reforços metálicos não garante, por si só, aumento do tempo resistente ao fogo. Observa-se que algumas configurações com barras de menor diâmetro (casos B8) resultam em ganhos marginais de força, porém sem incremento significativo e até com leve redução do tempo resistente, quando comparadas à viga sem reforço.

Por outro lado, as vigas com maiores diâmetros de barras (B10 e B12,5) associadas ao arranjo 1/6 apresentam comportamento claramente superior. Nessas configurações, a contribuição do aço torna-se mais efetiva na fase avançada do incêndio, compensando a perda de resistência da madeira carbonizada e retardando a instabilidade global do elemento. Os

ganhos de tempo da ordem de 14% e de força próximos a 11% confirmam a eficiência dessas soluções.

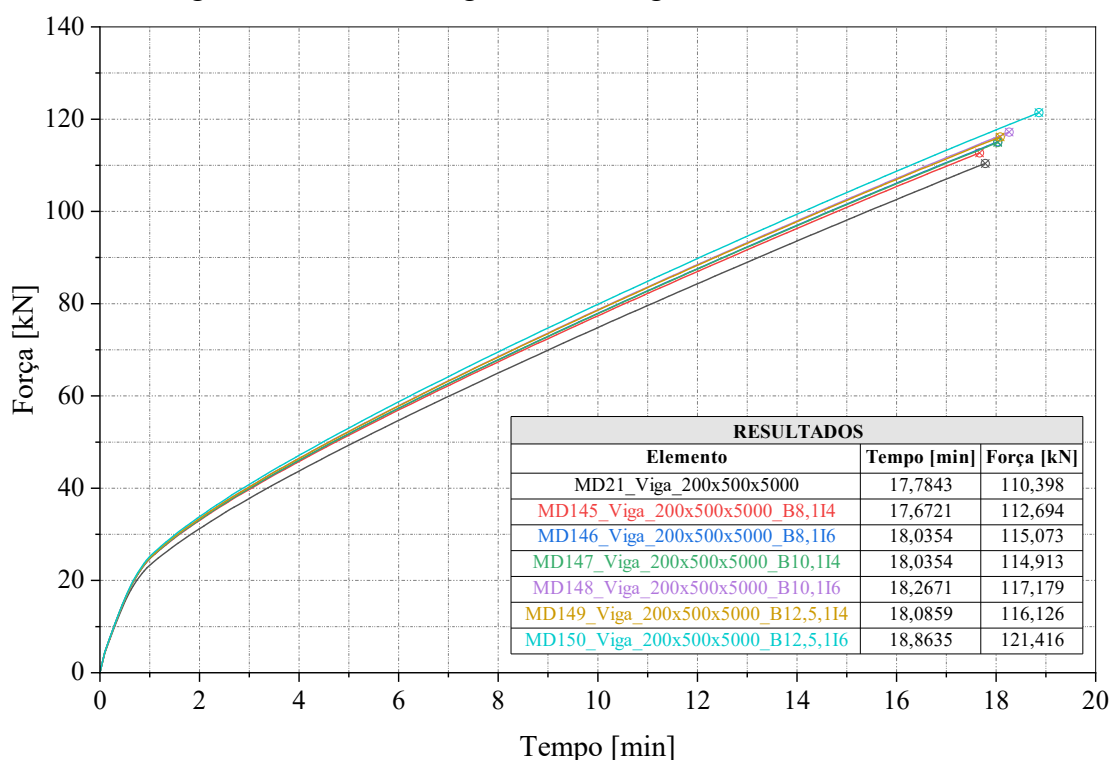
Do ponto de vista estrutural, os resultados indicam que, à medida que o vão aumentar, a sensibilidade do sistema à degradação térmica também se intensifica, tornando essencial o uso de reforços adequadamente dimensionados e posicionados.

5.21 BLOCO 21 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X500X5000

5.21.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 21

O Bloco 21 (Figura 95) contempla vigas com seção 200×500 mm e vão de 5000 mm, caracterizando elementos mais esbeltos e, portanto, mais sensíveis aos efeitos combinados de degradação térmica do material e amplificação dos deslocamentos. A viga de referência MD21_Viga_200x500x5000 apresenta tempo resistente próximo de 17,8 min e força máxima em torno de 110 kN, configurando um desempenho coerente com a tendência observada nos blocos anteriores: aumento do vão implica redução relativa da capacidade portante sob incêndio.

Figura 95 - Resultados gráficos das vigas 200x500x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

As vigas reforçadas exibem comportamento global superior, com curvas força *versus* tempo sistematicamente acima da viga de referência. O reforço metálico atua de forma progressiva ao longo do aquecimento, contribuindo para a manutenção da rigidez e para o retardo da perda de capacidade resistente. Nota-se que, diferentemente de blocos com vãos menores, neste bloco os ganhos de tempo são mais modestos, enquanto os ganhos de força tornam-se mais evidentes, sobretudo nas configurações com maior taxa de armadura.

5.21.2 Análise comparativa de resultados do bloco 21

A [Tabela 81](#) a seguir sintetiza a comparação quantitativa entre as vigas do Bloco 21 e a viga de referência MD21_Viga_200x500x5000, destacando os ganhos percentuais de tempo resistente e força máxima.

Tabela 84 - Resultados comparativos das vigas de 200x500x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD21 - Sem reforço	–	–
MD145 - B8 1/4	–0,63 %	+2,08 %
MD146 - B8 1/6	+1,41 %	+4,24 %
MD147 - B10 1/4	+1,41 %	+4,09 %
MD148 - B10 1/6	+2,71 %	+6,16 %
MD149 - B12,5 1/4	+1,70 %	+5,21 %
MD150 - B12,5 1/6	+6,06 %	+9,99 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.21.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 21

Os resultados desta seção indicam que, para vigas com vão elevado, a eficiência do reforço metálico está fortemente associada à sua taxa e ao arranjo geométrico. Configurações com barras de menor diâmetro e menor quantidade (B8 1/4) não proporcionam ganhos relevantes de tempo resistente, podendo inclusive apresentar leve redução quando comparadas à viga sem reforço. Entretanto, mesmo nesses casos, observa-se incremento de força máxima, evidenciando contribuição estrutural do aço antes da fase crítica de colapso.

À medida que se aumenta o diâmetro das barras e se adota o arranjo 1/6, os ganhos tornam-se mais consistentes, com destaque para a viga MD150, que apresenta acréscimos de aproximadamente 6% no tempo resistente e 10% na força máxima. Esse comportamento

confirma que, em vigas mais esbeltas, o reforço metálico atua principalmente como mecanismo de reserva resistente, reduzindo a taxa de degradação da capacidade portante sob incêndio.

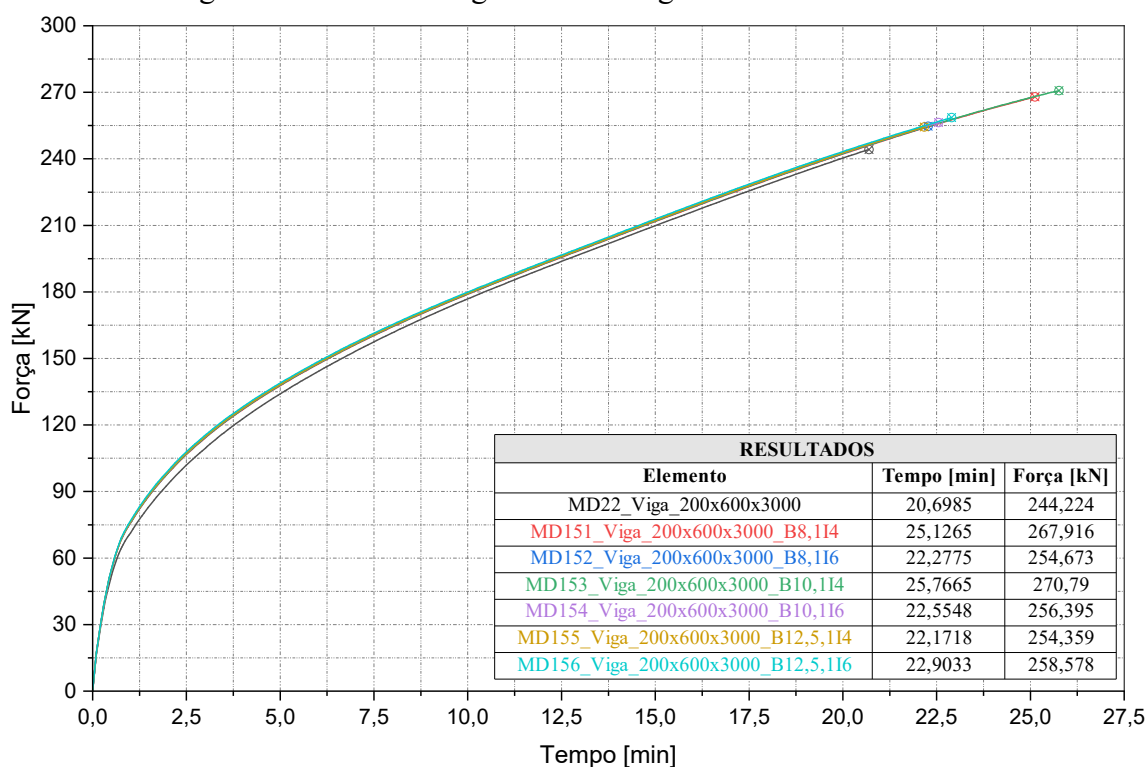
Do ponto de vista técnico, reforça-se a conclusão de que o aumento do vão limita os ganhos absolutos de tempo resistente obtidos com reforços discretos, mas não invalida sua eficácia. Pelo contrário, quando corretamente dimensionado, o reforço permite ganhos expressivos de capacidade mecânica, contribuindo para maior robustez estrutural e ampliando a margem de segurança em situação de incêndio.

5.22 BLOCO 22 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X3000

5.22.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 22

O Bloco 22 ([Figura 96](#)) contempla vigas com seção 200×600 mm e vão reduzido de 3000 mm, configuração que resulta em maior rigidez global e, conseqüentemente, em desempenho superior em situação de incêndio quando comparada aos blocos com vãos mais longos.

Figura 96 - Resultados gráficos das vigas 200x600x3000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A viga de referência MD22_Viga_200x600x3000 apresenta tempo resistente de aproximadamente 20,7 min e força máxima da ordem de 244 kN, evidenciando um patamar elevado de capacidade portante mesmo sem reforço metálico.

As curvas de força *versus* tempo mostram comportamento bastante próximo entre os modelos nas fases iniciais do aquecimento, com diferenciação progressiva à medida que a degradação térmica avança. As vigas reforçadas mantêm níveis mais elevados de força ao longo do tempo, indicando que o reforço metálico contribui tanto para o retardo do colapso quanto para a ampliação da capacidade resistente máxima, efeito potencializado pelo maior momento de inércia da seção transversal.

5.22.2 Análise comparativa de resultados do bloco 22

A seguir (Tabela 82) apresenta-se a comparação quantitativa entre as vigas do Bloco 22 e a viga de referência MD22_Viga_200x600x3000, com destaque para os ganhos percentuais de tempo resistente e força máxima.

Tabela 85 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x3000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD22 - Sem reforço	—	—
MD151 - B8 1/4	+21,39 %	+9,70 %
MD152 - B8 1/6	+7,62 %	+4,28 %
MD153 - B10 1/4	+24,48 %	+10,90 %
MD154 - B10 1/6	+8,96 %	+4,98 %
MD155 - B12,5 1/4	+7,12 %	+4,15 %
MD156 - B12,5 1/6	+10,62 %	+5,89 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.22.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 22

Os resultados do Bloco 22 evidenciam um comportamento distinto em relação aos blocos com vãos maiores, uma vez que a redução do vão para 3,0 m amplia significativamente a eficácia do reforço metálico em termos de tempo resistente ao fogo. Observa-se que as configurações com arranjo 1/4 apresentam os maiores ganhos de tempo, alcançando incrementos superiores a 20%, com destaque para a viga MD153, que combina maior diâmetro de barras e posicionamento mais eficiente.

Por outro lado, os arranjos 1/6 resultam em ganhos mais moderados de tempo, embora apresentem incrementos consistentes de força máxima. Esse comportamento sugere que, para

seções mais altas e vãos curtos, o reforço concentrado (1/4) atua de forma mais eficiente no controle da degradação térmica e na preservação da rigidez global do elemento.

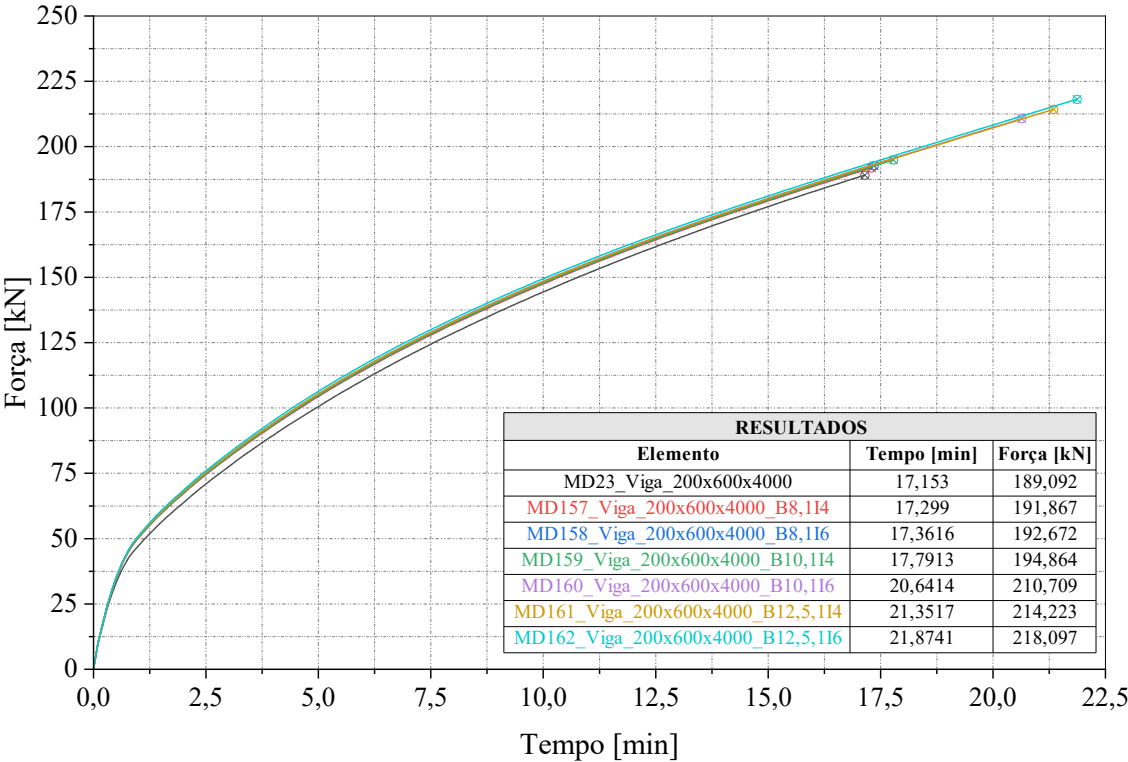
Do ponto de vista da força resistente, todas as vigas reforçadas superam a viga de referência, com ganhos variando entre aproximadamente 4% e 11%, confirmando que o reforço metálico contribui de maneira sistemática para o aumento da capacidade portante em situação de incêndio. Em síntese, quando combinadas seções mais robustas e vãos reduzidos, o reforço metálico apresenta elevada eficiência, sobretudo na ampliação do tempo resistente, reforçando seu potencial como estratégia de otimização do desempenho estrutural ao fogo.

5.23 BLOCO 23 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X4000

5.23.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 23

O Bloco 23 (Figura 97) avalia vigas com seção 200×600 mm e vão intermediário de 4000 mm, representando uma condição estrutural mais desfavorável que o Bloco 22 (3000 mm), porém ainda mais eficiente que os casos com vãos maiores.

Figura 97 - Resultados gráficos das vigas 200x600x4000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A viga de referência MD23_Viga_200x600x4000 apresenta tempo resistente ao fogo de aproximadamente 17,15 min e força máxima de 189,1 kN, valores coerentes com a redução da rigidez global associada ao aumento do vão.

Os resultados gráficos indicam comportamento inicial muito semelhante entre todos os modelos, com divergência progressiva nas fases intermediárias e finais do incêndio. Observa-se que as vigas reforçadas, especialmente aquelas com maior diâmetro de barras, mantêm níveis superiores de capacidade resistente e prolongam o tempo até o colapso, evidenciando a contribuição do reforço metálico na mitigação dos efeitos da degradação térmica.

5.23.2 Análise comparativa de resultados do bloco 23

A [Tabela 83](#) a seguir elenca a comparação direta entre as vigas reforçadas e a viga de referência MD23_Viga_200x600x4000, com os respectivos ganhos percentuais de tempo resistente e força máxima.

Tabela 86 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x4000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD23 - Sem reforço	—	—
MD157 - B8 1/4	+0,85 %	+1,47 %
MD158 - B8 1/6	+1,21 %	+1,89 %
MD159 - B10 1/4	+3,72 %	+3,05 %
MD160 - B10 1/6	+20,33 %	+11,42 %
MD161 - B12,5 1/4	+24,48 %	+13,28 %
MD162 - B12,5 1/6	+27,52 %	+15,33 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.23.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 23

Os resultados do Bloco 23 evidenciam de forma clara a sensibilidade do desempenho ao fogo ao aumento do vão, bem como a crescente importância do reforço metálico à medida que a estrutura se torna mais esbelta. Diferentemente do Bloco 22, observa-se que, para o vão de 4000 mm, os arranjos com maior taxa de armadura e maior afastamento (1/6) passam a apresentar desempenho superior em termos de tempo resistente, especialmente quando associados a barras de maior diâmetro.

As vigas com barras de 8 mm apresentam ganhos marginais tanto de tempo quanto de força, indicando que, para essa configuração geométrica, o reforço de menor diâmetro atua de forma limitada na contenção da degradação térmica. Em contrapartida, os modelos com barras

de 10 mm e 12,5 mm mostram incrementos expressivos, com ganhos de tempo superiores a 20%, atingindo até 27,5% no caso da MD162.

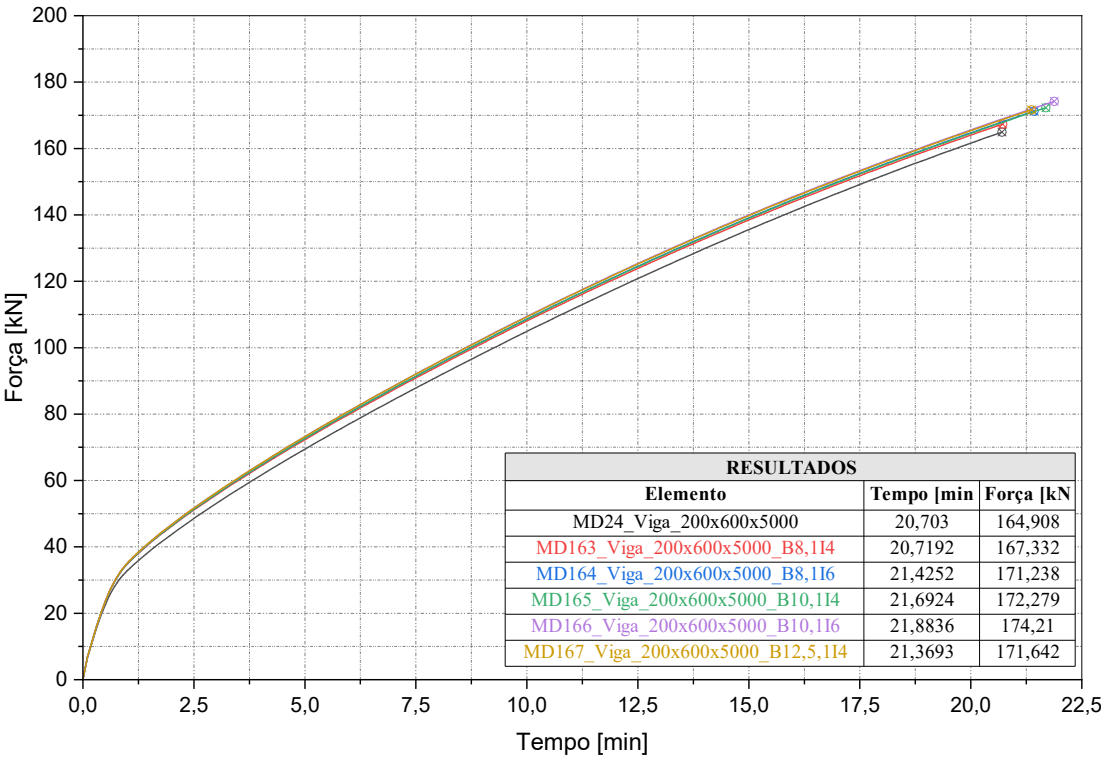
Do ponto de vista da força resistente, os ganhos acompanham a mesma tendência, alcançando incrementos superiores a 15%, o que reforça a eficácia do reforço metálico não apenas na ampliação do tempo de resistência ao fogo, mas também na preservação da capacidade portante residual.

5.24 BLOCO 24 - VIGAS COM GEOMETRIA 200X600X5000

5.24.1 Análise do comportamento força *versus* tempo do bloco 24

A [Figura 98](#) mostra as vigas com seção transversal 200×600 mm e vão de 5000 mm, caracterizando a condição de maior esbeltez. A viga de referência MD24_Viga_200x600x5000 apresenta tempo resistente ao fogo de 20,70 min e força máxima de 164,9 kN, refletindo a redução significativa da rigidez global e da capacidade resistente associada ao aumento do vão.

Figura 98 - Resultados gráficos das vigas 200x600x5000mm.



Fonte: Próprio Autor (2026).

As curvas de força *versus* tempo mostram comportamento inicial semelhante entre todos os modelos, com divergências progressivas à medida que a degradação térmica se intensifica. Nota-se que as vigas reforçadas mantêm maior capacidade resistente ao longo do incêndio, retardando a perda de rigidez e o colapso estrutural. Contudo, diferentemente dos blocos com vãos menores, os ganhos tornam-se mais moderados, evidenciando que o efeito do reforço passa a competir diretamente com os efeitos geométricos da esbeltez.

5.24.2 Análise comparativa de resultados do bloco 24

A [Tabela 84](#) a seguir apresenta a comparação direta entre as vigas do Bloco 24 e a viga de referência MD24_Viga_200x600x5000, incluindo os ganhos percentuais de tempo resistente e força máxima.

Tabela 87 - Resultados comparativos das vigas de 200x600x5000mm.

Modelo	Tempo [%]	Força [%]
MD24 - Sem referência	—	—
MD163 - B8 1/4	+0,08 %	+1,47 %
MD164 - B8 1/6	+3,50 %	+3,83 %
MD165 - B10 1/4	+4,79 %	+4,46 %
MD166 - B10 1/6	+5,71 %	+5,64 %
MD167 - B12,5 1/4	+3,22 %	+4,08 %

Fonte: Próprio Autor (2026).

5.24.3 Discussão técnica dos resultados do bloco 24

Os resultados do Bloco 24 evidenciam de forma clara os limites do ganho estrutural proporcionado pelo reforço metálico em vigas altamente esbeltas submetidas à ação do fogo. Embora todos os modelos reforçados apresentem desempenho superior à viga de referência, os incrementos observados são mais modestos quando comparados aos Blocos 22 e 23, especialmente em termos de tempo resistente.

As configurações com barras de 10 mm e maior afastamento (1/6) demonstram o melhor desempenho global, atingindo ganhos próximos a 6% tanto em tempo quanto em força máxima. Já as vigas com barras de 8 mm apresentam incrementos discretos, indicando que, para vãos elevados, o reforço de menor diâmetro possui influência limitada frente à perda acelerada de rigidez provocada pela elevação térmica.

O comportamento observado sugere que, no Bloco 24, o desempenho em situação de incêndio passa a ser fortemente governado pela geometria global da viga, especialmente pela relação vão/altura reduzindo a eficiência relativa do reforço. Ainda assim, a manutenção de ganhos consistentes de força máxima demonstra que o reforço metálico contribui para a preservação da capacidade portante residual, mesmo quando os ganhos de tempo resistente se tornam mais restritos. Em síntese, o Bloco 24 confirma que, para vãos elevados, o reforço deve ser criteriosamente dimensionado e combinado com estratégias complementares de proteção passiva para alcançar melhorias mais expressivas no desempenho ao fogo.

5.25 RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOMECÂNICAS

A [Tabela 85](#) sintetiza de forma abrangente os ganhos de tempo de exposição ao fogo obtidos para as diferentes configurações analisadas, permitindo uma leitura integrada da influência dos parâmetros geométricos e da disposição do reforço no desempenho estrutural das vigas. Observa-se, de maneira consistente, que os resultados não seguem um comportamento uniforme ao longo de todos os blocos, evidenciando a complexidade inerente à resposta termomecânica de sistemas híbridos madeira-aço.

Para vigas de menor inércia (blocos 1 a 12), verifica-se uma tendência predominantemente monotônica de aumento do tempo de resistência ao fogo, com ganhos expressivos que atingem valores superiores a 120%. Esse comportamento indica que, nessas configurações, o reforço atua de forma mais eficiente, promovendo redistribuição de tensões na seção remanescente e retardando os mecanismos de colapso. Além disso, nota-se que o aumento do vão está diretamente associado à amplificação dos ganhos, sugerindo uma interação favorável entre os efeitos geométricos e a atuação do reforço na zona tracionada. Nesse regime, o comportamento estrutural é fortemente governado pela contribuição mecânica do aço, que compensa de forma mais significativa a perda de capacidade resistente da madeira devido à carbonização.

Em contraste, para vigas de maior inércia (blocos 13 a 24), os resultados apresentam caráter mais disperso e ausência de ordenamento claro, caracterizando um comportamento não linear. Os ganhos de tempo tornam-se mais modestos e, em alguns casos, negativos, indicando que o reforço não atua de maneira uniformemente benéfica nessas configurações. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento da rigidez global da seção, que reduz a participação relativa do reforço no equilíbrio estrutural, bem como à maior complexidade dos mecanismos de interação entre madeira e aço sob gradientes térmicos elevados. Nesses casos, a resposta

estrutural passa a ser influenciada por múltiplos fatores concorrentes, como a evolução da frente de carbonização, a degradação diferencial das propriedades mecânicas e os efeitos de incompatibilidade térmica entre os materiais.

Tabela 88 - Resumo dos resultados de ganhos de tempo de exposição ao fogo dos blocos.

Bloco	Seção (mm)	Vão (mm)	Valor de referência (<i>t</i>)	Faixa de Ganhos de <i>t</i> (%)		Observação
				Menor	Maior	
1	100x150	3000	23,63	12,70	118,50	Tendência monotônica: ↑bitola e posicionamento na zona mais tracionada = ↑ganho de tempo resistente; Acréscimos de tempo (<i>t</i>) de exposição ao fogo até o colapso em função do vão (↑vão = ↑ <i>t</i>)
2	100x150	4000	30,63	38,10	122,90	
3	100x150	5000	42,64	15,50	118,80	
4	100x200	3000	14,87	10,60	26,10	
5	100x200	4000	22,73	8,80	26,00	
6	100x200	5000	32,76	0,00	20,30	
7	100x250	3000	11,28	6,90	23,10	
8	100x250	4000	16,59	18,60	26,70	
9	100x250	5000	23,98	8,30	24,20	
10	100x300	3000	10,28	4,60	17,10	
11	100x300	4000	15,04	4,50	19,00	Tendência não linear: Ausência de ordem clara nos resultados das vigas de maior inércia indica um comportamento estrutural regido por interações não lineares entre múltiplos mecanismos físicos, em vez de uma dependência monotônica simples com a geometria
12	100x300	5000	21,97	-0,70	13,90	
13	200x300	3000	12,31	-0,20	4,70	
14	200x300	4000	18,38	-1,95	4,18	
15	200x300	5000	25,38	-0,29	5,13	
16	200x400	3000	11,88	-6,76	-0,69	
17	200x400	4000	14,65	-1,88	2,81	
18	200x400	5000	19,97	-10,46	2,26	
19	200x500	3000	13,86	0,86	18,99	
20	200x500	4000	14,48	-0,71	14,15	
21	200x500	5000	17,78	-0,63	6,06	
22	200x600	3000	20,69	7,12	24,48	
23	200x600	4000	17,15	0,85	27,52	
24	200x600	5000	20,70	0,08	5,71	

Fonte: Próprio Autor (2026).

Outro aspecto relevante evidenciado pelos resultados é a forte dependência da redução de rigidez com o vão da viga, indicando que a resposta estrutural em situação de incêndio não pode ser dissociada das condições geométricas globais. Adicionalmente, observa-se que o aumento do diâmetro das barras contribui positivamente para a redistribuição de tensões, embora seus efeitos sejam mais pronunciados em seções menos robustas. A posição do reforço também se confirma como parâmetro crítico, sendo mais eficiente quando localizado na zona de maior solicitação à tração.

5.26 RESULTADOS DE ANÁLISE DA REGRESSÃO SIMBÓLICA

5.26.1 Análise multivariada

A [Figura 99](#) apresenta a matriz de dispersão e as distribuições de frequência associadas às variáveis que compõem o banco de dados analisado. Foram consideradas como variáveis independentes a largura da viga (b), a altura da seção (h), o comprimento (l), a área de aço longitudinal (A_s) e a distância entre o centro geométrico da armadura e a face inferior da seção (d'), sendo o tempo de resistência ao fogo (t) adotado como variável resposta.

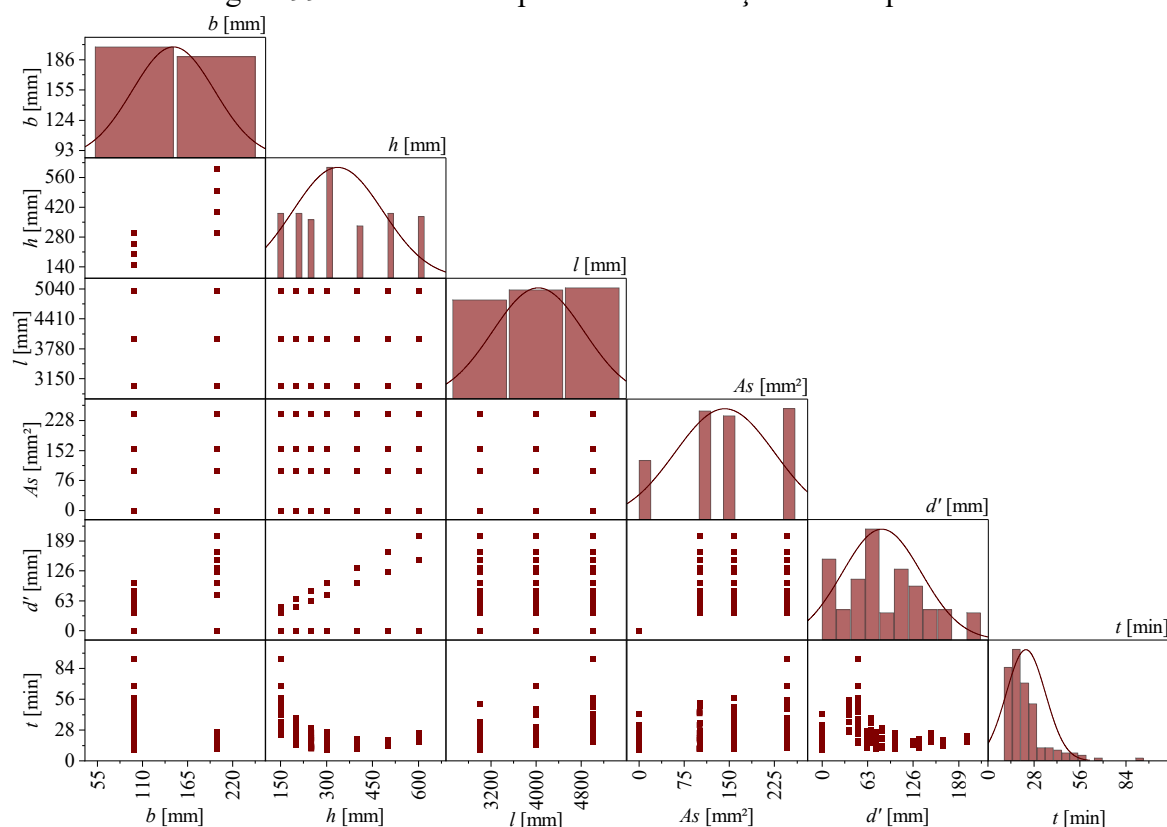
A inspeção dos histogramas evidencia que as variáveis independentes não seguem distribuição contínua uniforme, apresentando concentrações em valores discretos. Esse comportamento decorre do fato de os dados não serem aleatoriamente amostrados, mas sim derivados de combinações geométricas e construtivas representativas de dimensões comerciais, o que resulta em picos de frequência em determinados intervalos. Em contraste, o histograma da variável resposta apresenta assimetria positiva, indicando concentração predominante de resultados em valores reduzidos de tempo de resistência ao fogo (inferiores a aproximadamente 30 min), com cauda estendida para valores superiores.

A análise bivariada observada na matriz de dispersão permite identificar padrões relevantes entre as variáveis. Em relação à altura da seção (h), observa-se tendência inversamente proporcional com o tempo t , indicando que seções de menor altura apresentam, em média, maiores valores e maior variabilidade de resistência ao fogo. À medida que h aumenta, nota-se redução tanto do valor médio quanto da dispersão de t , sugerindo influência significativa dessa variável na resposta estrutural avaliada.

Para o comprimento da viga (l), verifica-se tendência oposta, com aumento progressivo do tempo t associado ao crescimento dessa dimensão. Observa-se também ampliação da variabilidade dos resultados para valores mais elevados de l , indicando interação potencial com outras variáveis geométricas e mecânicas.

No caso da área de aço longitudinal (A_s), a análise indica que incrementos na taxa de armadura contribuem para o aumento do tempo de resistência ao fogo. Além disso, a dispersão dos resultados cresce com o aumento de A_s , sugerindo que seções mais armadas apresentam maior sensibilidade às combinações paramétricas adotadas, reforçando o caráter multifatorial do fenômeno.

Figura 99 - Matriz de dispersão e distribuições de frequência.



Fonte: Próprio Autor (2026).

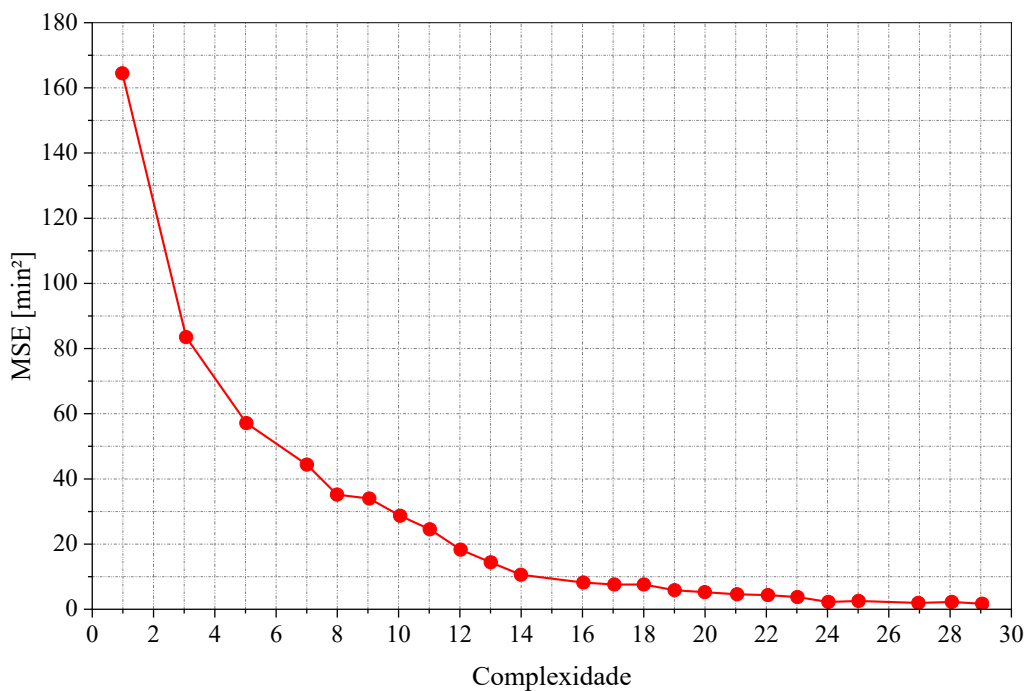
A variável d' apresenta distribuição concentrada em valores reduzidos, predominantemente no intervalo inferior do domínio considerado. Observa-se que valores situados aproximadamente entre 0 e 125 mm estão associados aos maiores tempos de resistência ao fogo, evidenciando influência da posição relativa da armadura no desempenho térmico-estrutural.

De forma geral, a avaliação conjunta das relações observadas indica ausência de dependência linear simples capaz de descrever isoladamente o comportamento da variável resposta. O tempo de resistência ao fogo resulta da interação simultânea entre múltiplos parâmetros geométricos e mecânicos, caracterizando um sistema de natureza não linear e multivariada. Esse comportamento justifica a adoção de técnicas de modelagem baseadas em regressão simbólica, capazes de capturar relações complexas e não previamente definidas entre as variáveis.

5.26.2 Modelo de regressão simbólica

O algoritmo de regressão simbólica, configurado com os parâmetros apresentados na [Tabela 59](#), identificou um conjunto de 24 expressões candidatas consideradas adequadas para a representação do fenômeno analisado. A relação entre a complexidade estrutural dessas equações e o erro quadrático médio (MSE) é apresentada na [Figura 100](#), permitindo avaliar o desempenho preditivo em função do nível de sofisticação matemática do modelo. Observa-se uma tendência consistente de redução do MSE com o aumento da complexidade, evidenciando que modelos com maior número de termos e operações possuem maior capacidade de capturar as interações não lineares entre as variáveis. Esse comportamento é esperado em processos de regressão simbólica, nos quais a ampliação do espaço funcional explorado tende a proporcionar ajustes mais precisos aos dados, ainda que à custa de maior complexidade interpretativa.

Figura 100 - Complexidade *versus* métricas de erro.



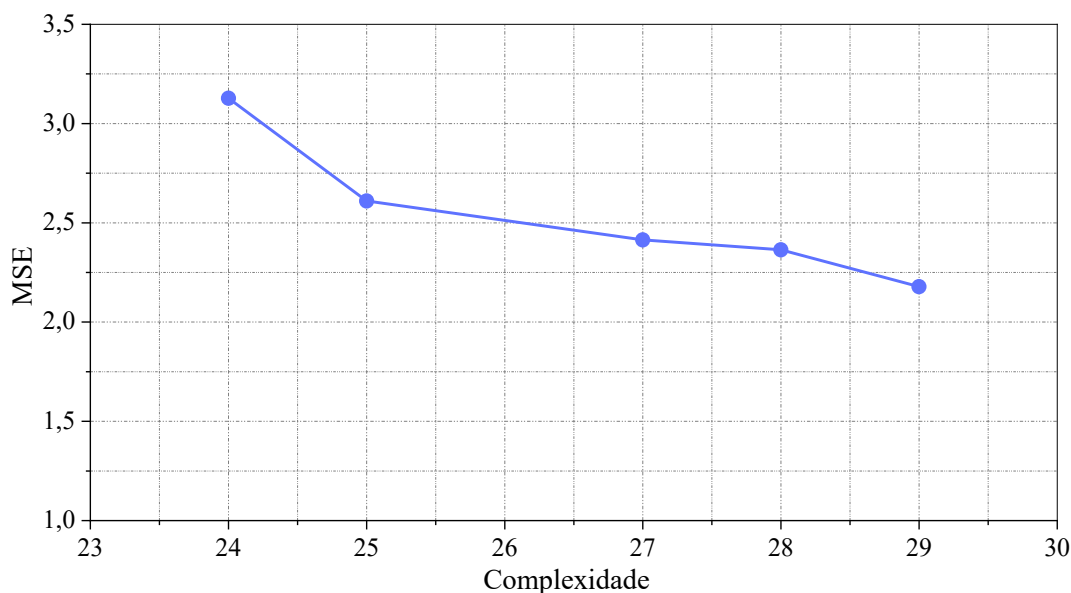
Fonte: Próprio Autor (2026).

A [Figura 101](#) apresenta a variação das métricas de desempenho no intervalo de complexidade compreendido entre 24 e 29, faixa que corresponde ao patamar em que os valores de MSE observados na [Figura 100](#) se estabilizam. Foram avaliadas três medidas de erro: o erro quadrático médio (MSE), o erro máximo e o erro percentual médio absoluto (MAPE),

permitindo uma análise comparativa abrangente do comportamento preditivo das equações candidatas.

Observa-se que tanto o MSE quanto o MAPE apresentam tendência de redução gradual com o aumento da complexidade, indicando melhoria progressiva do ajuste global dos modelos. Em contrapartida, o erro máximo não segue comportamento monotônico, atingindo valores mínimos para as equações com complexidade 24 e 28. A comparação entre os modelos de maior complexidade (28 e 29) revela desempenho global semelhante em termos de ajuste médio, entretanto, a equação de complexidade 28 destaca-se por apresentar menor erro máximo, evidenciando maior robustez na previsão dos casos mais críticos e justificando sua seleção como solução preferencial sob o critério de equilíbrio entre precisão e parcimônia estrutural.

Figura 101 - Complexidade *versus* métricas de erro.

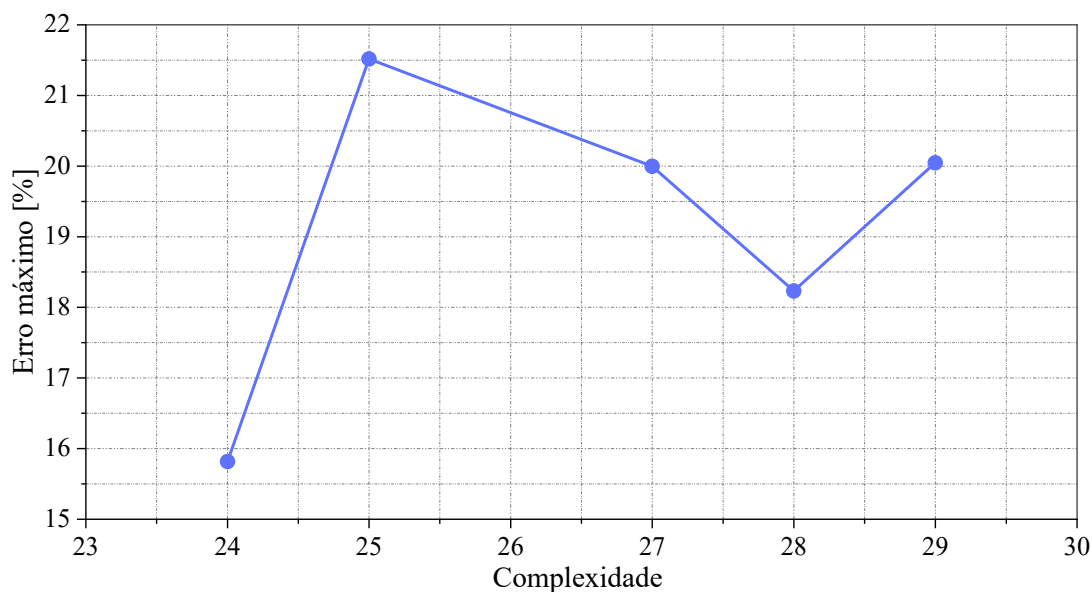


Fonte: Próprio Autor (2026).

A [Figura 102](#) apresenta a relação entre a complexidade das expressões obtidas por regressão simbólica e o erro máximo associado a cada modelo. Essa análise permite avaliar a sensibilidade das equações candidatas frente aos desvios extremos de previsão, complementando a interpretação baseada em métricas médias.

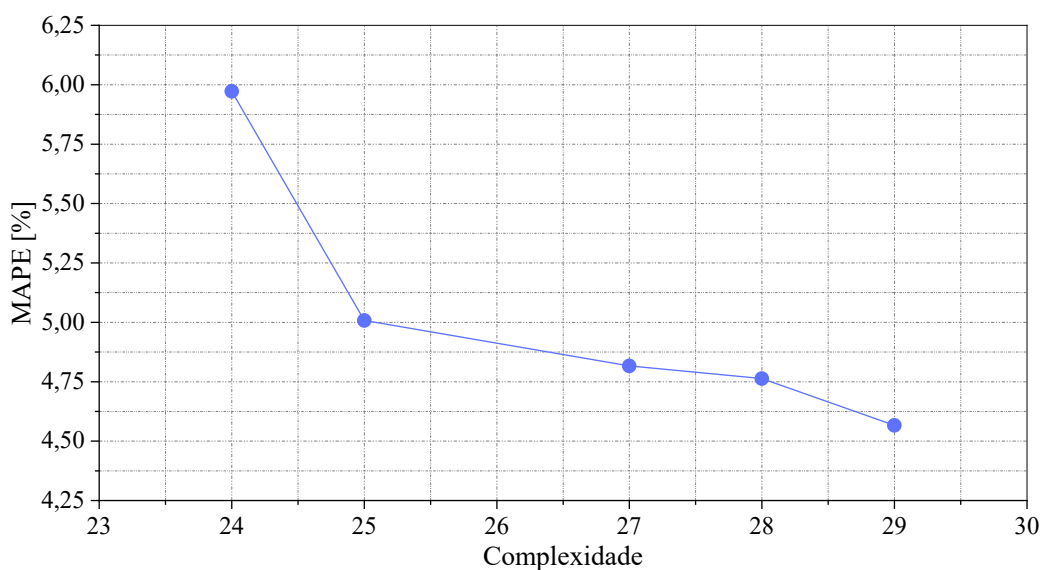
Figura 103 apresenta a relação entre a complexidade das equações obtidas e o erro percentual médio absoluto (MAPE), permitindo avaliar o comportamento do erro relativo médio em função do refinamento estrutural dos modelos.

Figura 102 - Complexidade versus erro máximo.



Fonte: Próprio Autor (2026).

Figura 103 - Complexidade versus MAPE.



Fonte: Próprio Autor (2026).

5.26.3 Expressão final estimada para o tempo de resistência ao fogo (t)

Com base na análise comparativa das expressões candidatas e nos critérios de desempenho previamente estabelecidos, foi selecionado o modelo que apresentou o melhor equilíbrio entre precisão preditiva e complexidade estrutural. A equação resultante (Equação 26), obtida por meio do algoritmo de regressão simbólica, representa de forma analítica a relação funcional entre as variáveis geométricas e mecânicas consideradas e o tempo de

resistência ao fogo. Sua formulação permite não apenas a estimativa direta da variável resposta, mas também a interpretação dos efeitos combinados dos parâmetros de entrada, constituindo uma ferramenta compacta e aplicável para avaliações preliminares e análises paramétricas no contexto investigado.

$$t[\text{min}] = -0,05691h + (L + b) \left(0,006446 - \frac{67,328}{d'(A_s+b)-h^2} + \frac{0,0004629h^3}{L^2} \right) \quad (26)$$

Em que t é o tempo de ruptura da viga exposta ao fogo (min), l é o comprimento da viga (mm), b é a largura da seção transversal da viga (mm), h é a altura da seção transversal da viga (mm), A_s é a área total de aço presente na seção transversal (mm²) e d' é a distância entre a face inferior da viga e a linha do centro de gravidade das barras de aço (mm).

5.26.4 Acurácia do modelo proposto

A avaliação da acurácia do modelo, realizada por meio de métricas globais de erro e análise residual, encontra-se sintetizada na [Tabela 86](#). Observa-se que a equação apresentou desempenho satisfatório não apenas no conjunto de treinamento, mas também no conjunto de validação, evidenciando capacidade adequada de generalização. As métricas calculadas para os diferentes subconjuntos de dados (treinamento, validação e total) confirmam a consistência do ajuste obtido.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 98,45$) indica elevada capacidade explicativa do modelo em relação ao conjunto completo de dados, demonstrando que a maior parte da variabilidade observada é capturada pela expressão proposta. Complementarmente, os valores de RMSE (4,79 min) e MAPE (4,79%) evidenciam níveis reduzidos de erro absoluto médio e erro percentual, respectivamente, reforçando a precisão preditiva da equação e sua adequação para estimativas do tempo de resistência ao fogo dentro do domínio analisado.

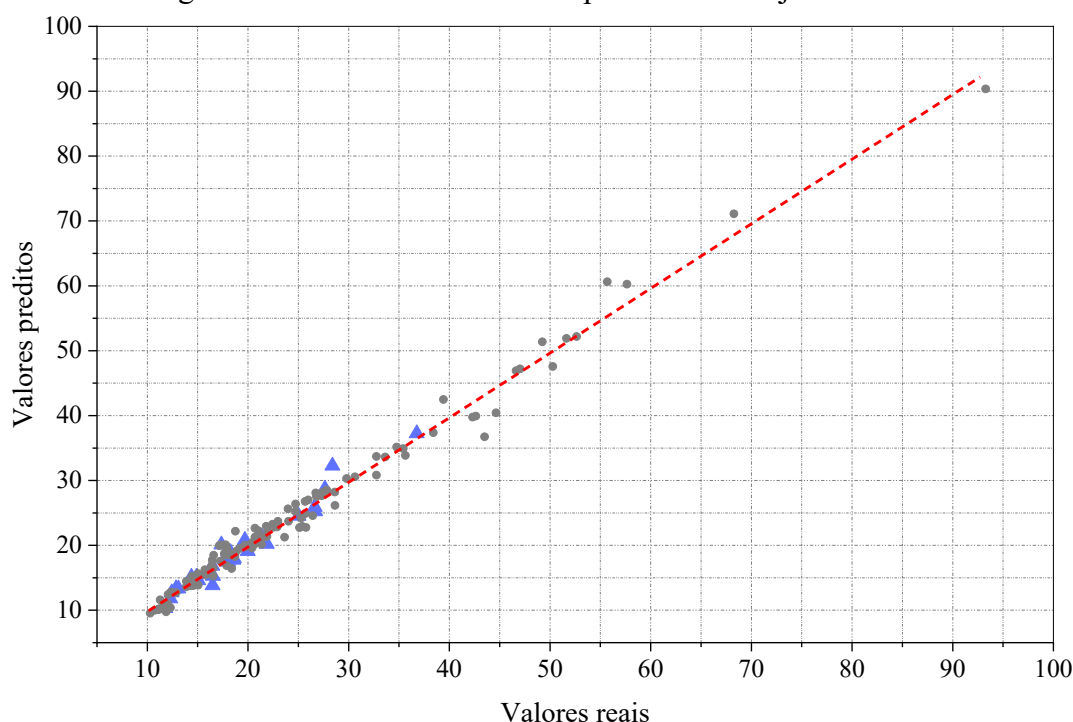
Tabela 89 - Métricas do modelo - treinamento.

Conjunto	R ² (%)	MAPE (%)	MSE (min ²)	RMSE (min)
Treinamento	98,56	4,76	2,36	1,54
Validação	95,13	4,88	1,54	1,24
Total	98,45	4,79	2,20	1,48

Fonte: Próprio Autor (2026).

A precisão do modelo pode ser corroborada por meio da análise gráfica apresentada na [Figura 104](#), na qual se observa elevada concordância entre os valores preditos e os observados. A proximidade dos pontos em relação à linha de tendência indica forte correlação entre as grandezas, evidenciando a capacidade do modelo em reproduzir adequadamente o comportamento dos dados e reforçando a confiabilidade da equação proposta para fins preditivos.

Figura 104 - Valores reais *versus* preditos no conjunto total.

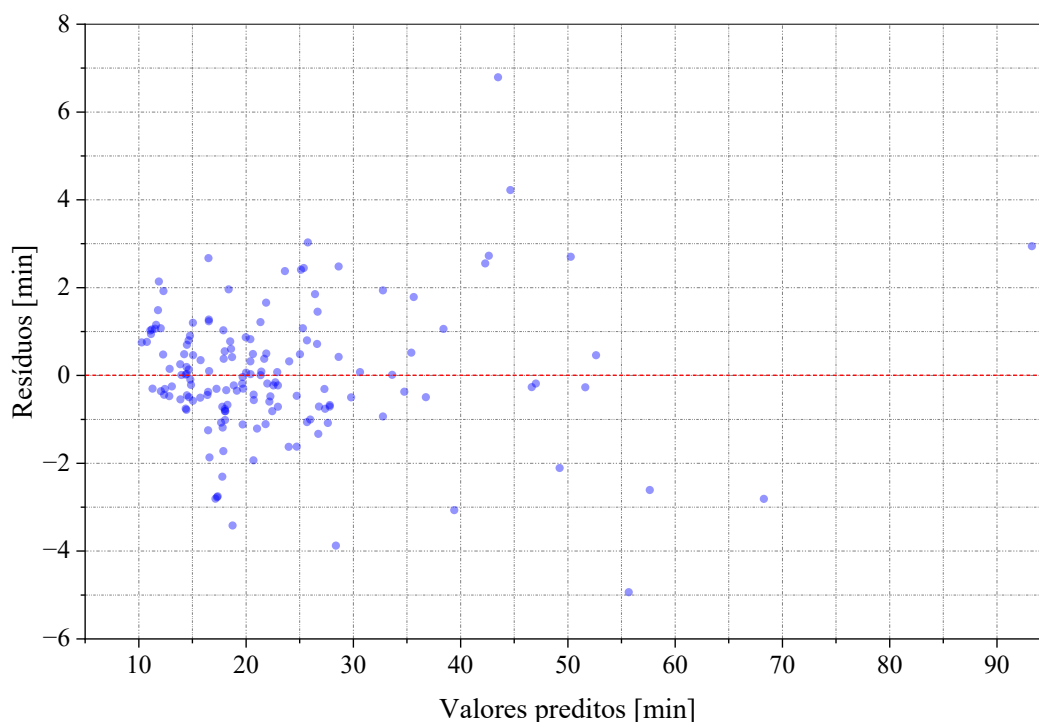


A [Figura 105](#) apresenta a relação entre os resíduos do modelo e os valores preditos, permitindo avaliar o comportamento da dispersão do erro ao longo do domínio analisado. Observa-se uma tendência de aumento da variabilidade dos resíduos à medida que os valores estimados crescem, indicando a presença de heterocedasticidade e, consequentemente, variância não constante do erro. Esse comportamento sugere maior precisão do modelo para estimativas de menor magnitude, particularmente para tempos inferiores a aproximadamente 30 min, e maior incerteza associada às previsões de valores elevados de t .

Tal padrão pode ser atribuído à distribuição do conjunto de dados, no qual predominam amostras associadas a menores tempos de resistência ao fogo, conforme evidenciado anteriormente pelos histogramas apresentados na [Figura 99](#). Ainda assim, a análise quantitativa dos resíduos demonstra desempenho satisfatório do modelo: verifica-se que 78,71% das

previsões apresentam erro inferior ou igual a 1 min, 91,61% apresentam erro de até 2 min e 98,06% permanecem dentro de um limite de 3 min, indicando boa precisão global mesmo diante da variabilidade observada.

Figura 105 - Resíduos no conjunto.



De modo geral, os resultados obtidos demonstram que o modelo derivado por regressão simbólica apresenta elevada capacidade preditiva e consistência estatística dentro do domínio analisado. A análise multivariada evidenciou a natureza não linear do fenômeno e a influência combinada das variáveis geométricas e mecânicas, justificando a adoção de uma abordagem de modelagem baseada em equações analíticas evolutivas. A avaliação por métricas globais, inspeção gráfica e análise residual confirmou a robustez da equação selecionada, indicando bom ajuste tanto para o conjunto de treinamento quanto para validação, além de erros absolutos reduzidos para a maior parte das observações. Embora tenha sido observada maior dispersão para valores elevados da variável resposta, o desempenho global do sistema permanece satisfatório, reforçando a aplicabilidade do modelo para estimativas preliminares e análises paramétricas. Assim, os resultados sustentam a validade da metodologia empregada e estabelecem base consistente para as discussões e interpretações apresentadas na seção seguinte.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos blocos 1 a 24, foi possível extrair conclusões consistentes sobre o comportamento mecânico, térmico e estrutural dos sistemas analisados. As principais conclusões estão relacionadas abaixo.

1. Sobre o comportamento estrutural em situação de incêndio
 - a. Em todos os blocos analisados, observou-se que o comportamento força *versus* tempo apresenta três estágios bem definidos:
 - I. fase inicial com elevada rigidez e crescimento rápido da força resistente;
 - II. fase intermediária com redução gradual da rigidez associada à degradação térmica dos materiais;
 - III. fase final caracterizada por instabilidade global e colapso estrutural.
 - b. A ação térmica promoveu redução progressiva da rigidez global das vigas, independentemente da geometria, sendo a taxa dessa redução fortemente dependente do vão, da seção transversal e da presença de reforço;
 - c. As vigas sem reforço apresentaram, de forma sistemática, menores tempos resistentes e menores forças máximas, confirmando a vulnerabilidade estrutural de sistemas não reforçados quando submetidos a incêndio.
2. Em relação a influência da geometria e do vão no desempenho ao fogo
 - a. O aumento do vão teve impacto direto e significativo na redução do desempenho estrutural em situação de incêndio, sendo identificado como um dos parâmetros mais críticos do problema;
 - b. Para vigas com mesma seção transversal, o aumento do vão resultou em:
 - I. redução da faixa de tempo resistente ao fogo dentro do mesmo bloco de resultados;
 - II. diminuição da força máxima suportada;
 - III. maior sensibilidade à degradação térmica e à perda de rigidez.
 - c. Vigas mais esbeltas (maior relação vão/altura) apresentaram ganhos relativos menores com a introdução do reforço, indicando que, para grandes vãos, os efeitos geométricos passam a dominar o comportamento estrutural.

3. Efeito do reforço metálico no desempenho estrutural

- a. A introdução de reforço metálico embutido mostrou-se altamente eficaz para o aumento da capacidade resistente e do tempo de resistência ao fogo em vigas de seções com menor inércia, diferentemente nas seções de maior inércia onde a influência do reforço mostrou-se menos pronunciada no tempo resistente, atuando predominantemente no aumento da força resistente;
- b. Em comparação com as vigas de referência (sem reforço), as vigas reforçadas apresentaram ganhos consistentes de:
 - I. força máxima resistente, variando conforme geometria e configuração do reforço;
 - II. tempo resistente ao fogo, com incrementos mais expressivos em vigas de menor vão e menor inércia.
- c. O reforço atuou como um mecanismo de redistribuição de esforços e de retardo da perda de rigidez, contribuindo para uma resposta estrutural mais estável durante o incêndio e principalmente como redistribuidor de tensões nas vigas de maior inércia.

4. Influência do diâmetro e do posicionamento do reforço

- a. O aumento do diâmetro das barras metálicas resultou, de modo geral, em melhorias no desempenho estrutural, sendo observados maiores ganhos tanto em força quanto em tempo resistente;
- b. Configurações com barras de maior diâmetro apresentaram maior capacidade de absorção de esforços residuais, especialmente nas fases intermediária e final do incêndio;
- c. O posicionamento do reforço mostrou influência significativa no desempenho global, sendo que arranjos com posicionamento a 1/6 da face inferior da viga apresentaram melhor preservação da capacidade resistente.

5. Comparação entre blocos e tendências globais

- a. Os Blocos iniciais (menores vãos) apresentaram os maiores ganhos percentuais com o uso do reforço, tanto em tempo quanto em força máxima;

- b. À medida que o vão aumentou (Blocos finais), os ganhos percentuais tornaram-se mais moderados, porém ainda tecnicamente relevantes, especialmente no que se refere à capacidade portante residual;
- c. Mesmo nos casos mais desfavoráveis (Blocos 23 e 24), o reforço metálico demonstrou capacidade de mitigar parcialmente os efeitos adversos da esbeltez, mantendo ganhos consistentes de capacidade portante residual em relação às vigas sem reforço.

6. Implicações práticas e de projeto

- a. Os resultados indicam que o uso de reforço metálico embutido constitui uma estratégia estrutural viável e eficiente para o aumento da segurança ao fogo de vigas estruturais;
- b. Para vigas de grandes vãos, recomenda-se que o reforço seja associado a estratégias complementares de proteção passiva, como aumento de cobrimento ou revestimentos térmicos, a fim de maximizar os ganhos de tempo resistente;
- c. O dimensionamento do reforço em situação de incêndio deve considerar de forma integrada:
 - I. geometria da viga;
 - II. vão estrutural;
 - III. diâmetro e posicionamento das barras;
 - IV. critérios de desempenho baseados não apenas em resistência, mas também em tempo de colapso.

7. Modelagem por regressão simbólica

- a. A aplicação da regressão simbólica demonstrou ser uma abordagem eficiente para a identificação de relações analíticas entre os parâmetros geométricos e mecânicos das vigas e o tempo de resistência ao fogo, permitindo representar um fenômeno intrinsecamente não linear por meio de uma expressão matemática compacta e interpretável;
- b. A equação obtida apresentou elevada capacidade explicativa e precisão preditiva, conforme evidenciado pelos indicadores estatísticos e pela análise gráfica de ajuste,

mantendo desempenho consistente tanto nos conjuntos de treinamento quanto de validação;

- c. A análise residual indicou comportamento global satisfatório do modelo, com erros absolutos reduzidos para a maioria das previsões, ainda que com aumento de dispersão para valores elevados da variável resposta, associado à menor representatividade desses casos no banco de dados;
- d. A formulação simbólica resultante mostrou-se adequada para aplicações práticas de engenharia, possibilitando estimativas rápidas e análises paramétricas sem necessidade de execução de simulações numéricas completas;
- e. Os resultados confirmam o potencial da integração entre simulação numérica e técnicas de inteligência artificial como ferramenta complementar para apoio ao dimensionamento estrutural em situação de incêndio, ampliando as possibilidades de exploração de cenários e contribuindo para o desenvolvimento de metodologias preditivas mais acessíveis e eficientes.

8. Considerações finais

A análise global dos Blocos 1 a 24 confirma que o desempenho estrutural em situação de incêndio é resultado da interação complexa entre efeitos térmicos, mecânicos e geométricos. O reforço metálico embutido mostrou-se uma solução estrutural eficiente, capaz de melhorar significativamente o comportamento ao fogo, especialmente em vigas de menor e médio vão, nas quais os maiores incrementos percentuais de tempo resistente ao fogo foram observados. As conclusões obtidas fornecem subsídios técnicos relevantes para o desenvolvimento de critérios de projeto mais seguros e racionalizados, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre estruturas submetidas a incêndio.

Para vigas de maior inércia, observa-se um comportamento mais esparso nos resultados, sem um padrão claro de ordenamento, o que indica uma resposta estrutural menos previsível. Esse efeito sugere que, à medida que a rigidez global da seção aumenta, a influência do reforço em aço e de sua posição tende a se manifestar de forma menos uniforme, possivelmente devido a interações mais complexas entre os mecanismos resistentes. Nesse contexto, esse campo ainda permanece em aberto, demandando investigações mais aprofundadas que correlacionem a inércia da seção com a eficiência do reforço, a fim de estabelecer tendências mais consistentes e modelos representativos.

Por fim, a modelagem por regressão simbólica mostrou-se uma ferramenta eficaz para representar, por meio de uma formulação analítica compacta, a relação entre os parâmetros geométricos e mecânicos e o tempo de resistência ao fogo, evidenciando a viabilidade da integração entre simulações numéricas e técnicas de inteligência artificial na análise estrutural. A equação obtida apresentou bom desempenho preditivo e potencial de aplicação em estimativas preliminares e estudos paramétricos, contribuindo para ampliar as possibilidades de avaliação de sistemas estruturais submetidos a incêndio.

REFERÊNCIAS

- AICHER, Simon; DILL-LANGER, Gerhard; RINGGER, Thomas. Non-destructive detection of longitudinal cracks in glulam beams. **Otto-Graf-Journal**, v. 13, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198** – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-97**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2395-17** – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4442-20** – Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119-1** – Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. **National Design Specification (NDS) for Wood Construction**. Leesburg, VA: AWC, 2018.
- ANGELIS, D.; SOFOS, F. Artificial Intelligence in Physical Sciences: Symbolic Regression Trends and Perspectives. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 30, p. 3845–3865, 2023.
- ANGST, V.; MALO, K. A. The effect of climate variations on glulam: an experimental study. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 5, p. 603–613, set. 2012.
- ARAÚJO, H. J. B. de. **Caracterização do material madeira**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 41 p.
- ARAÚJO, H. J. Estudo das correlações e estimativas de propriedades físicas e mecânicas de madeiras brasileiras com aptidão ao manejo florestal. **4o Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal**, 2005.
- ARAÚJO, H. J. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n.3, setembro 2007.
- ARCHDAILY. *Mjøstårnet: The Tower of Lake Mjøsa / Voll Arkitekter*. Disponível em: <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter/>. Acesso em: 29 abr. 2025, às 14h.

ASDRUBALI, F. *et al.* A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and Environment**. Elsevier Ltd, 1 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:2022** – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16936:2023** – Edificações em light wood frame. Rio de Janeiro: ABNT, 07 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323:2013** — Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. **UNE 56544:2017** – Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid: UNE, 2017.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 4063:2010** – Timber – Structural – Test methods: Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Sydney/Wellington: Standards Australia/Standards New Zealand, 2010.

BABRAUSKAS, V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations. **Fire Safety Journal**, v. 40, n. 6, p. 528–554, 2005.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n.1, p. 19-28, 2005.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n.3, p 371-380, 2003.

BELCHIOR, M. et al. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2ª Edição. 2012

BENDTSEN, B. A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, v.18, p. 23-38, 1986.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York. 1982.

BRANDÃO, Juliana Barbosa. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de três espécies florestais**. Universidade Federal de Manaus. Orientador: Nabor da Silveira Pio. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade do Amazonas, Amazonas. 2010.

BRANDNER, R.; BOGENSPERGER, T. **In plane shear strength of cross laminated timber (CLT): test configuration, quantification and influencing parameters**. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259891586>. Acesso em: 01 maio 2025, às 15h

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 408:2010+A1:2012** – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. London: BSI, 2012.

BUREAU OF STANDARDS, METROLOGY & INSPECTION (MOEA, Taiwan). **CNS 12514-6** – Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 6: Specific requirements for beams. Taipei: BSMI, 2014.

CABRERO, Jose Manuel; GEBREMEDHIN, Kifle G. **Evaluation of failure criteria in wood members**. 2010.

CANOPYRSS TECH. *Home page*. 2023. Disponível em: <https://www.canopyrss.tech/>. Acesso em: 21 out. 2025.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Reinforcement of timber beams with steel bars: parametric analysis using the finite element method. **Buildings**, v. 12, n. 7, 1 jul. 2022.

CORRADI, M. *et al.* Flexural behaviour of hardwood and softwood beams with mechanically connected GFRP plates. **Composite Structures**. Elsevier Ltd, 15 dez. 2018.

DAMASCENO SILVA, Thiago. **Influência dos modelos de carbonização na análise não linear geométrica de treliças de madeira em situação de incêndio**. Orientador: André Luis Christoforo. 2022. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

DE ARAUJO, V. A. *et al.* Can timber houses be productively faster to build than other buildings? **Revista Árvore**, v. 46, 2022a.

DE ARAUJO, V. A. *et al.* Costs of timber houses in different standards and productions in Brazil. **Ingeniería**, Bogotá, v. 28, n. 1, e18228, 2022b.

DE ARAUJO, Victor *et al.* Timber construction regulations in Brazil: a perspective from its national industry of timber houses. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 9, art. 2136, 2023.

DE ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N. Redes de conhecimento como estratégia de desenvolvimento de subsetores fabris: participação dos produtores brasileiros de casas de madeira em eventos técnicos e científicos. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 61, n. 2, p. 299–313, 2024.

DE OLIVEIRA, E. *et al.* Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v.30, n.2, p. 311-318, 2006.

DONADON, B. F. *et al.* Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, 1 jan. 2020.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. *Novo terminal no aeroporto de Oslo*. Disponível em: <https://eficienciaenergtica.blogspot.com/2017/05/novo-terminal-no-aeroporto-de-oslo.html/>. Acesso em: 29 abr. 2025, às 13h20.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **UNI EN 10083/1998** – Steels for quenching and tempering – Technical delivery conditions. Milano: UNI, 1998.

ESPACENET. *Advanced Patent Search (Portuguese)*. Disponível em: https://lp.espacenet.com/advancedSearch?locale=pt_LP. Acesso em: 21 out. 2025.

ESPACENET. *Advanced Patent Search (Spanish)*. Disponível em: https://lp.espacenet.com/advancedSearch?locale=es_LP. Acesso em: 21 out. 2025.

ESPACENET. *Worldwide Patent Database*. Disponível em: <https://worldwide.espacenet.com/>. Acesso em: 21 out. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2:2005** — Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design. Brussels: CEN, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13183-1:2002** — Moisture content of a piece of sawn timber — Part 1: Determination by oven dry method. Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14081-1** — Timber structures — Strength graded structural timber with rectangular cross section — Part 1: General requirements. Brussels: CEN, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1** — Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2** — Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2-2: General — Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 384:2016** — Structural timber — Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels: CEN, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408** — Timber structures — Structural timber and glued laminated timber — Determination of some physical and mechanical properties. Brussels: CEN, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **prEN 1194** — Timber structures — Glued laminated timber — Strength classes and determination of characteristic values. Brussels: CEN, 1999.

EXPLORE GRAND EST. *A Day at the Centre Pompidou-Metz*. Disponível em: <https://www.explore-grandest.com/en/offerings/activities/city-adventures/a-day-at-the-centre-pompidou-metz/>. Acesso em: 29 abr. 2025, às 13h11.

FALK, R. H. et al. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Forests and Climate Change Working Paper**. Roma. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Relatório Anual 2020**. Roma. 2020.

FARIA, L. P. A. B. de; MAGALHÃES, W. L. E.; MATOS, M. de. Avaliação da adesão de revestimentos em madeiras tratadas com bio-óleo e com bio-óleo aditivado com nanopartículas. In: **XVI EVINCI**. Colombo/PR, 25 jul. 2017.

FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio**. Orientador: Jorge Munaiar Neto. 2018. 174 f. Dissertação (Escola de Engenharia de São Carlos) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno. **Análise do comportamento em temperatura ambiente e em situação de incêndio de vigas mistas de madeira e concreto sem e com reforço com fibras de vidro**. Orientador: Jorge Munaiar Neto. 2022. 197 f. Tese (Escola de Engenharia de São Carlos) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

FIGUEROA, A.; M. P. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, n. 9, p. 157–174, 2005.

FILHO, J. C. de P. *et al.* Diagnosis of the use of wood as construction material in the city of Mossoró-RN/Brazil. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

IORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 8, p. 1431–1440, out. 2011.

FORZZA, RC., org., *et al.* **Catálogo de plantas e fungos do Brasil [online]**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio: Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 871 p. Vol. 1. ISBN 978-85-8874-242-0.

FOSSETTI, M.; MINAFÒ, G.; PAPIA, M. Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 54–64, 22 jul. 2015.

FRANGI, A.; FONTANA, M. Fire performance based design of multi-storey timber buildings. **Iabse Symposium Lisbon**, Lisboa, 2005.

FRANGI, A. *et al.* Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 8, p. 1078–1087, 2009.

GARBACHEVSKI, É. M. *et al.* Physico-mechanical properties and growth characteristics of pine juvenile wood as a function of age and planting spacing. **Revista Árvore**, v. 46, 2022.

GERHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. **Wood and Fiber**, v.14, n1, p. 4-36, 1982.

GLASS, Samuel V.; ZELINKA, Samuel L. Moisture relations and physical properties of wood. In: **General Technical Report**. Cap. 4. FPL-GTR-282. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.

GOLI, G. *et al.* Thermal expansion of wood at different equilibrium moisture contents. **Journal of Wood Science**, v. 65, p. 4, 2019.

- GÓMEZ, E. P. *et al.* Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. **Composite Structures**, v. 213, p. 308–316, 1 abr. 2019.
- GRANT, D. J.; ANTON, A.; LIND, P. Bending strength, stiffness, and stress-grade of structural *Pinus radiata*: effect of knots and timber density. **New Zealand Journal of Forest Science**, v.14, n.3, p. 331-348, 1984.
- GU, H.; HUNT, J. F. Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part III: effect of moisture content on thermal conductivity. **Wood and Fiber Science**, V.39, n.1, p. 159-166, 2007.
- HE, M. *et al.* An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams. **Frontiers in Materials**, v. 8, 10 jan. 2022.
- HILDEBRANDT, J.; HAGEMANN, N.; THRÄN, D. The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 405–418, 1 out. 2017.
- HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**, London, v. 193, n. 1033, p. 281–297, 1948.
- HIMES, A.; BUSBY, G. Wood buildings as a climate solution. **Developments in the Built Environment**, v. 4, 1 nov. 2020.
- HUBBELL, S. P. *et al.* How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct? **PNAS**, v.105, suppl.1, 2008.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2019**. Brasília. 2019.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2021**. Brasília. 2021.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2024**. Brasília. 2024.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834 – Fire-resistance tests – Elements of building construction**. Geneva: ISO, 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNADC 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.
- JIANG, J.; LI J.; GAO, Q. Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 74–81, 30 jan. 2015.
- JUST, A. *et al.* Protection of timber members – determination of the fire protection system characteristics for the verification of the load-bearing resistance by means of calculation models. *In: Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire*, 8., 2014, Shanghai, China. Shanghai: [s.n.], 2014.

KÁTAI-URBÁN, L. *et al.* Examination of the fire resistance of construction materials from beams in chemical warehouses dealing with flammable dangerous substances. **Fire**, v. 6, n. 8, 1 ago. 2023.

KHELIFA, M. *et al.* Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with carbon fibre-reinforced polymers. **Engineering Structures**, v. 101, p. 364–375, 5 out. 2015.

KLIPPEL, F. A.; FONTANA, M. Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire. **Fire Safety Science**, v. 10, p. 1219–1232, 2011.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. de. **Química da madeira**. 4. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.

KOTOULEK, P. Effect of different moisture contents on the thermal properties of wood. **Journal on Processing and Energy in Agriculture**, v.23, n.1, p. 24-26, 2019.

KOZOWOOD. *O 1º edifício de vários pisos de madeira no Brasil*. Disponível em: <https://kozowood.com/jornal/o-1-edificio-de-varios-pisos-de-madeira-no-brasil/>. Acesso em: 29 abr. 2025, às 13h47.

LA ROSA GARCÍA, P.; ESCAMILLA, A. C.; GONZÁLEZ GARCIA, M.N. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering*, v. 55, p. 528–536, 2013.

LATORRACA, J. V. de F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, n. 7, p. 279–291, dez. 2000.

LEGGATE, W. *et al.* Influence of wood's anatomical and resin traits on the radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) wood in Australia. **Bioresources**, v.15, n.3, p. 6851-6873, 2020.

LENG, C. *et al.* Radial variation and early prediction of wood properties in *Pinus elliottii* Engelm. plantation. **Forests**, v. 15, n. 5, 1 maio 2024.

LUCA, V. de; MARANO, C. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 206–217, maio 2012.

LUDWIG, G. The Role of Law in Transformative Environmental Policies — A Case Study of Timber in Buildings Construction in Germany. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 842, 2019.

MAÑKOWSKI, P.; KARWAT, Z.; LASKOWOSKA, A. Assessment of the modulus of rupture and modulus of elasticity in static bending of yellow pine earlywood and latewood. **Forests**, v. 16, n. 2, 1 fev. 2025.

MARTINS, Carlos Eduardo de J. **Avaliação estrutural de elementos de madeira lamelada colada**. Orientador: Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias. 2018. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.

MARTINS, Gisele C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira lamelada colada em situação de incêndio**. Orientador: Carlito Calil Junior. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MASCIA, N. T.; SIMONI, R. A. Analysis of failure criteria applied to wood. **Engineering Failure Analysis**, v. 35, p. 703–712, 15 dez. 2013.

MATSUOKA, N. *et al.* Heat resistance of steel bar–timber composite beam. *In: Proceedings of the 12th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2021)*, 12., 2021, Santiago, Chile. Santiago: [s.n.], 2021.

MATSUSHITA, S.; SHIOYA, S. A new method for modelling temperature within steel bar–timber composite beam using data by burning test. *In: Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, 13., 2023a, Oslo, Norway. Oslo: [s.n.], 2023a.

MATSUSHITA, S.; SHIOYA, S. Burning test of steel bar–timber composite beam. *In: Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, 13., 2023b, Oslo, Norway. Oslo: [s.n.], 2023b.

MAYARD, R. *et al.* Influence of growth rings on the mechanical properties of Pinus wood. **Madera y Bosques**, v. 28, n. 3, 1 out. 2022.

MELLO, A. B. De *et al.* Resistência ao cisalhamento de juntas de Pinus sp. coladas com adesivo epóxi e rompidas sob compressão e sob torção. **Ambiente Construído**, v. 25, 2025.

MENEZES, W.; SANTINI, E.; SOUZA, J.; GATTO, D.; HASELEIN, C. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, n. 6, p. 1019–1024, 2014.

MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES (MAFF). **Policies and initiatives for sustainable wood use promotion**. [S.l.]: MAFF; Rinya, 2022.

MISSIO, A. L. *et al.* Mechanical properties of Pinus elliottii tapped wood. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1432–1438, 31 jul. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial**. Brasília, DF: MMA, 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA); SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Florestas do Brasil: dados e estatísticas 2024**. Brasília, DF: MMA; SFB, 2024.

MODES, K. S. *et al.* Caracterização físico-mecânica da madeira de *Pinus glabra* Walt. *In: Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2021a. p. 177–191.

MODES, K. S. *et al.* Caracterização mecânica e biológica da madeira de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. para indicações de uso. *In: Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2021b. p. 192–204.

MOLINA, J.; CALIL, C. J. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira – wood frame systems for wood homes. **Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 143–156, 2010.

MORAES NETO, S. P. *et al.* **Propriedades mecânicas da madeira de cinco procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* implantadas no cerrado do Distrito Federal, DF.** Planaltina, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2009. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br>

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira.** 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, 2005.

MOYA, L.; BAÑO, V. Elastic behavior of fast-growth Uruguayan pine determined from compression and bending tests. **Bioresource** 12:5896–5912. 2017

MUSTEFAGA, E. C. *et al.* Hybrid panels produced with particles and veneers of pine wood in different compositions. **Revista Árvore**, v. 48, 2024.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 220** – Standard on Types of Building Construction. Quincy, MA: NFPA, 2021.

NATURAL RESOURCES CANADA. **Evaluation of the Green Construction through Wood (GCWood) program.** Ottawa: Natural Resources Canada, 2025.

NADIR, Y. *et al.* Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547–555, 1 jun. 2016.

NGUYEN, M. H. *et al.* Method of measuring the temperature of wood exposed to fire with type K thermocouples. **Fire Safety Journal**, v. 137, 1 maio 2023.

NUBISSIE, A.; NGAMIE, A. N.; WOAFO, P. Dynamical behavior of a wooden beam under mechanical loading and fire. **Materials and Design**, v. 32, n. 3, p. 1331–1336, mar. 2011.

OLIVEIRA, F. L. De *et al.* Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Inst. Flor.**, v. 18, pág. 59-70, 1 maio 2006.

OLIVEIRA, S. S. De *et al.* Validation and verification of numerical model for simulation of the operating principle of the oscillating water column device. **Ciência e Natura**, v. 46, n. esp. 1, 18 dez. 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL (OMPI). **Relatório Mundial sobre Propriedade Intelectual 2024.** Genebra: OMPI, 2024.

PADILHA, V. H. L. *et al.* Shear strength of pine wood bonded joints with different angles obtained using compression and torsional testing methods. **Revista Árvore**, v. 47, 2023.

PADILHA, M. T. *et al.* Assessment of glued laminated timber beams reinforced with steel bars under bending at high temperatures. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 47. Article number 611. 2025.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. n71, 2021.

PANORAMA DE VIAGEM. *Metrópole Parasol – Setas de Sevilha*. Disponível em: <https://panoramadeviagem.com.br/metropol-parasol-setas-sevilha/>. Acesso em: 29 abr. 2025, às 12h50.

PEČENKO, R.; SVENSSON, S.; HOZJAN, T. Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 87, p. 598–605, 10 maio 2015.

PELOZZI, M. M. A. *et al.* Propriedades físicas dos lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* e de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 2, p. 305–313, 2012.

PERTUZZATTI, A. *et al.* Wood densification. **Bioresources**. v.13, n.1, p. 1576-1590, 2018.

PERTUZZATTI, A. *et al.* Propriedades físicas da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* termorretrificada sob diferentes atmosferas. **Revista Ciência da Madeira – RCM**, v. 7, n. 1, p. 7–15, 30 abr. 2016.

PINTO, Edna Moura. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o *Eucalyptus citriodora* e *E. grandis***. 2005. Orientador: Carlito Calil Junior. 138 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

PIRES, G. *et al.* Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, v.11, n.1, p. 01-06, 2004.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Nonlinear numerical modelling of FRP reinforced glued laminated timber. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 40–50, 2013.

RAFTERY, G. M.; KELLY, F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. **Composites Part B: Engineering**, v. 70, p. 9–19, 1 mar. 2015.

RAFTERY, G. M.; RODD, P. D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 116–125, 1 maio 2015.

RESCALVO, F. J. *et al.* Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material. **Construction and Building Materials**, v. 304, 18 out. 2021.

RESCALVO, F. J. *et al.* Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. **Composite Structures**, v. 186, p. 29–38, 15 fev. 2018.

RIBAS JUNIOR, A. da S. *et al.* Non-linear orthotropic numerical simulation for monitoring wood embedment tests according to BS EN 383 (2007) Standard European. **Revista Matéria**, v. 29, n. 4, 2024.

SANTOS SILVA, Guilherme dos. **Estimativa de carga limite de serviço em placas CLT: desenvolvimento de equação e software**. Orientador: André Luis Christoforo. 2025. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

SANTOS SILVA, G. *et al.* Two-dimensional estimation of service load limit in CLT plates. *Engineering Structures*, v. 328, p. 119702, 2025.

SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 33–39, 2013.

SCHAFFER. **Charring rate of selected woods – transverse to grain**. Madison: U.S. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1967. (Research Paper FPL 69, April 1967).

SCOCZYNSKI, R. R. *et al.* Avaliação do desempenho acústico de um escritório de planta livre construído com madeira engenheirada. In: **Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2024, Maceió. Maceió: ANTAC, 2024.

SIEGLOCH, A. M.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. *Revista Ciência da Madeira – RCM*, v. 6, n. 3, p. 149–165, 26 dez. 2015.

SIZES.COM. *Janka hardness units*. Disponível em: <https://www.sizes.com/units/janka.htm/>. Acesso em: 9 maio 2025, às 13h03.

SORIANO, J.; PELLIS, B.P.; MASCIA, N.T. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. *Composite Structures*, v. 150, p. 200–207, 15 ago. 2016.

ŠPILÁK, D. *et al.* Determining the charred layer of wooden beams with finite element analysis based on enthalpy approach. *Buildings*, v. 12, n. 7, 1 jul. 2022.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 1720.4** - Timber structures: Fire resistance of structural timber members. Sydney: Standards Australia, 1990.

STEEGE, H. TER *et al.* Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science*, v. 342, n. 6156, p. 1243092, 2013.

TEREZO, R. F. *et al.* Bending properties of cross-laminated timber panels produced with *Pinus taeda* from a mountain region in Santa Catarina, Brazil. *Revista Floresta*, v. 53, p. 299–4, set. 2023.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE (USPTO). *Patent Public Search*. Disponível em: <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/>. Acesso em: 21 out. 2025.

VAHEDIAN, A.; SHRESTHA, R.; CREWS, K. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: full-scale experiments. *Composites Part B: Engineering*, v. 164, p. 377–389, 1 maio 2019.

VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C. *et al.* Resin ducts as resistance traits in conifers: linking dendrochronology and resin-based defences. *Tree Physiology*, v. 40, n. 5, p. 628–640, 2020.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991.

VIBERATE. *Centro de Convenções Ulysses Guimarães (CCUG)*. Disponível em: <https://www.viberate.com/venue/centro-de-convencoes-ulysses-guimaraes-ccug/>. Acesso em: 23 abr. 2025, às 14h.

VIDAURRE, G. B. *et al.* Propriedades da madeira de reação. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 26–37, 2013.

VIVIAN, M. A. *et al.* Production cycles of *Pinus taeda* L. older more than 30 years: an alternative for obtaining wood for solid and structural uses. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, p. 573–596, 2022.

WANG, J. Y. *et al.* Durability of mass timber structures: a review of the biological risks. **Wood and Fiber Science**, v. 50, p. 110–127, 1 ago. 2018.

WANG, S. *et al.* Deformation of heated and loaded wooden stick: towards fire safety design of timber structure. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, 1 jul. 2025.

WDOWIAK-POSTULAK, A. Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass pre-stressed bars. *Composite Structures*, v. 305, 1 fev. 2023.

WDOWIAK-POSTULAK, A.; KAWECKI, B. Investigations on structural-sized GLT beams reinforced with steel and FRP composite bars: experimental tests and nonlinear numerical approach. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 25, n. 2, 1 fev. 2025.

WHITE, R. H. **Charring rates of different wood species**. 1998. Tese (PhD) – University of Wisconsin, Madison, 1998.

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). *PATENTSCOPE – Global Patent Search*. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf>. Acesso em: 21 out. 2025.

XU, B. H. *et al.* Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners. **Journal of Wood Science**, v. 59, n. 1, p. 17–23, 1 fev. 2013.

YANG, H. *et al.* Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 73–83, 15 abr. 2016a.

YANG, H. *et al.* Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: experimental and theoretical evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 550–563, 1 mar. 2016b.

YANG, T. H. *et al.* The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. **Building and Environment**, v. 44, n. 2, p. 231–236, fev. 2009.

YARNAN, B. Comparative wood anatomy of *Pinus sylvestris* and its var. *compacta* in the West Black Sea region of Turkey. **IAWA Journal**, v.28, n.1, p. 75-81, 2007.