

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS SERTÃO
UNIDADE ACADÊMICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VITOR FERNANDO LIMA RAMOS

**CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA: COMPARAÇÃO
ENTRE SEÇÕES OTIMIZADAS E NÃO OTIMIZADAS PARA SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO PELO MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA**

Delmiro Gouveia - AL

2025

VITOR FERNANDO LIMA RAMOS

**CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA: COMPARAÇÃO
ENTRE SEÇÕES OTIMIZADAS E NÃO OTIMIZADAS PARA SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO PELO MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharelado em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alverlando Silva Ricardo.

Delmiro Gouveia - AL

2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/661

- R175c Ramos, Vitor Fernando Lima.
 Confiabilidade estrutural de vigas de madeira : comparação entre seções otimizadas e não otimizadas para situação de incêndio pelo método da seção reduzida / Vitor Fernando Lima Ramos. – 2025.
 44 f. : il.
- Orientador: Alverlando Silva Ricardo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 43-44.
1. Confiabilidade estrutural. 2. Otimização estrutural. 3. Vigas de madeira.
4. Incêndio. 5. Método da seção reduzida. I. Título.

CDU: 691.11

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder sabedoria, força e perseverança para concluir essa etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, Edilene Pereira e Édio Ramos, meu amor e eterna gratidão por todo apoio, incentivo e dedicação durante o curso e em todas as fases da minha vida. Sem vocês, eu não seria quem sou hoje.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), pela oportunidade de cursar Engenharia Civil, e a todos os professores que contribuíram para a minha formação. Em especial, agradeço ao meu orientador, Dr. Alverlando Ricardo, pelo apoio, orientação e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas de curso, que fizeram parte dessa caminhada. Um agradecimento especial a Guilherme Cardial, Larissa Maia e Luiz Antônio, companheiros desde o início da graduação, sempre presentes nos desafios e nas conquistas.

Ao amigo Hiago Albuquerque, que considero um verdadeiro parceiro de TCC, pela colaboração e incentivo constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento se tornasse realidade, o meu mais sincero muito obrigado.

Folha de Aprovação

VITOR FERNANDO LIMA RAMOS

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA: COMPARAÇÃO ENTRE SEÇÕES OTIMIZADAS E NÃO OTIMIZADAS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 13 de maio de 2025.



Documento assinado digitalmente
ALVERLANDO SILVA RICARDO
Data: 27/05/2025 16:44:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador – Prof. Dr. Alverlando Silva Ricardo (UFAL)

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
VINICIUS COSTA CORREIA
Data: 28/05/2025 16:49:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno – Prof. Dr. Vinícius Costa Correia (UFAL)



Documento assinado digitalmente
SALVATORE VERDE
Data: 28/05/2025 17:25:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno – Prof. Dr. Salvatore Verde (UFAL)

RESUMO

A resistência das estruturas de madeira em incêndios está diretamente relacionada à robustez dos elementos estruturais. No entanto, a otimização de seções de vigas pode proporcionar um uso mais eficiente do material sem comprometer a segurança. Contudo, essa otimização afeta a confiabilidade estrutural, sendo necessário quantificar a segurança residual das vigas ao longo do tempo de exposição ao fogo. Para isso, este estudo investiga a confiabilidade estrutural de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas, utilizando abordagens probabilísticas. A análise é conduzida com a Simulação de Monte Carlo (MCS) e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), considerando vigas submetidas a incêndios e avaliadas pelo método da seção reduzida. A influência da perda de material devido à carbonização é incorporada ao modelo, permitindo uma estimativa da resistência residual ao longo do tempo de exposição ao fogo. Foram testadas vigas com quatro faces expostas, analisando os impactos da otimização estrutural na probabilidade de falha. Os resultados indicam que a otimização pode ser um fator determinante para a segurança estrutural em incêndios, pois vigas com maior altura na seção transversal apresentaram menor probabilidade de falha. Além disso, a modelagem permitiu quantificar a influência de diferentes tempos de exposição ao fogo na degradação da estrutura. Conclui-se que a integração entre confiabilidade estrutural e otimização contribui para o desenvolvimento de projetos mais eficientes, possibilitando um equilíbrio entre segurança e economia de material.

Palavras-chave: Confiabilidade estrutural; Otimização estrutural; Vigas de madeira; Incêndio; Método da seção reduzida.

ABSTRACT

The fire resistance of timber structures is directly related to the robustness of their structural elements. However, optimizing beam cross-sections can lead to a more efficient use of material without compromising safety. This optimization, however, affects structural reliability, making it necessary to quantify the residual safety of beams over the duration of fire exposure. In this context, this study investigates the structural reliability of optimized and non-optimized timber beams using probabilistic approaches. The analysis is carried out using Monte Carlo Simulation (MCS) and the First Order Reliability Method (FORM), considering beams exposed to fire and evaluated through the reduced cross-section method. The influence of material loss due to charring is incorporated into the model, enabling the estimation of residual strength over different fire exposure times. Beams with four faces exposed to fire were tested to analyze the impacts of structural optimization on failure probability. The results indicate that optimization can be a determining factor for structural safety in fire scenarios, as beams with greater cross-sectional height exhibited lower failure probabilities. Furthermore, the modeling enabled quantification of the influence of varying fire exposure times on structural degradation. It is concluded that the integration of structural reliability and optimization contributes to the development of more efficient designs, allowing a balance between safety and material economy.

Keywords: Structural reliability; Structural optimization; Timber beams; Fire; Reduced cross-section method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das seções na madeira segundo o método da seção transversal reduzida	19
Figura 2 - Geometria do problema	24
Figura 3 - Índices de sensibilidade para equação de estado limite G2 – Seção transversal não otimizada (30×40 cm)	38
Figura 4 - Índices de sensibilidade para equação de estado limite G2 – Seção transversal otimizada para suportar 30 minutos de incêndio (14 × 63 cm).....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico $P_f \times$ tempo (min) em função da seção transversal – Monte Carlo.....	33
Gráfico 2 - Gráfico $P_f \times$ tempo (min) em função da seção transversal – FORM.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros das variáveis aleatórias do problema. (Adaptado de Cheung et al. (2012))	26
Tabela 2 - Resumo do Processo de Otimização.....	29
Tabela 3 - Dimensões otimizadas da viga de madeira para suportar diferentes tempos de exposição ao fogo	30
Tabela 4 - Probabilidade de falha para diferentes dimensões de seção transversal sob condições normais de temperatura.....	32
Tabela 5 - Probabilidade de falha para diferentes dimensões de seção transversal em situação de incêndio.....	34
Tabela 6 - Probabilidade de falha em função do tempo para diferentes dimensões de seção transversal em situação de incêndio	36
Tabela 7 - Índices de sensibilidade para seção transversal não otimizada (30×40 cm).....	39
Tabela 8 - Índices de sensibilidade para seção transversal otimizada para suportar 30 minutos de incêndio (14 × 63 cm)	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FORM	Método de Confiabilidade de Primeira Ordem
GRG	<i>Generalized Reduced Gradient</i>
ISO	Organização Internacional de Padronização
RT	<i>Risk Tool</i>
MCS	Simulação de Monte Carlo
PQS	Programação Quadrática Sequencial
SORM	Método de Confiabilidade de Segunda Ordem

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Largura
b_{min}	Menor dimensão da seção transversal
d_0	Profundidade de carbonização adicional devido ao arredondamento das arestas
$d_{char,0}$	Profundidade da camada carbonizada
$d_{char,n}$	Profundidade virtual de carbonização
d_{ef}	Profundidade efetiva
E_{c0}	Módulo de Elasticidade
f_{co}	Resistência à compressão paralela às fibras
f_{ik}	Fator de ajuste estatístico
f_k	Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras
g	Carregamento permanente
g_1	Modo de falha devido às tensões normais
g_2	Modo de falha devido às tensões normais na seção residual sob condição de incêndio
g_3	Modo de falha por deformação excessiva em condições normais
g_k	Valor característico da carga permanente
h	Altura
k_0	Coefficiente de ajuste relacionado ao tempo de exposição ao fogo
$k_{mod,fi}$	Coefficiente de modificação para incêndio
q	Carregamento variável
q_k	Valor característico da carga variável
T	Tempo de incêndio
t	Tempo em minutos
V	Volume
α	Taxa de carbonização
β	Índice de confiabilidade
β_0	Taxa de carbonização básica
β_n	Taxa de carbonização virtual
θ_{amb}	Temperatura inicial do ambiente
θ_E	Parâmetro de incerteza do efeito da ação
θ_g	Temperatura dos gases em °C no tempo t
θ_R	Parâmetro de incerteza da resistência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Confiabilidade e Otimização de Vigas de Madeira Submetida ao Fogo	16
2.1.1	Modelagem do Incêndio.....	16
2.2	Otimização Estrutural	17
2.3	Dimensionamento de Estruturas de Madeira em Situação de Incêndio.....	18
2.3.1	Método da Seção Transversal Reduzida.....	18
2.4	Ferramenta Computacional <i>Risk Tool</i> (RT)	20
2.4.1	Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM)	21
2.4.2	Método de Simulação de Monte Carlo.....	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Descrição do problema	24
3.2	Informações sobre a análise da confiabilidade do problema	25
3.3	Informações sobre a otimização do problema	26
3.3.1	Formulação do Problema de Otimização	27
3.3.2	Parâmetros Utilizados	28
4	RESULTADOS.....	30
4.1	Avaliação das Dimensões Otimizadas para Diferentes Tempos de Incêndio	30
4.2	Análise da Probabilidade de Falha sob Condições Normais de Temperatura	31
4.3	Análise da Probabilidade de Falha em Situação de Incêndio	33
4.4	Índices de sensibilidade das variáveis aleatórias no ponto de projeto.....	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

As estruturas expostas a incêndios representam um desafio significativo para a engenharia, devido às alterações no comportamento dos materiais sob altas temperaturas, o que pode comprometer a integridade estrutural. A madeira é um material amplamente utilizado na construção civil, especialmente em estruturas de vigas, devido às suas propriedades estéticas e sustentáveis. Em situações de incêndio, no entanto, o comportamento estrutural da madeira é influenciado por sua combustibilidade e pela formação de uma camada carbonizada. Vários estudos sugerem que otimizar o dimensionamento dessas vigas pode melhorar seu desempenho em situações de incêndio, (Pech et al., 2019), (Jelušič e Kravanja 2017), mas há, aparentemente, uma lacuna em pesquisas que comparam diretamente a confiabilidade de vigas otimizadas e não otimizadas sob essas condições.

A confiabilidade de uma estrutura refere-se à probabilidade de que ela não falhe ao longo de sua vida útil projetada, considerando as condições operacionais e de projeto (Beck, 2019). Em situações de incêndio, essa análise se torna mais complexa devido à imprevisibilidade do incêndio e ao comportamento variável dos materiais sob altas temperaturas (Ricardo, 2022). Ferramentas como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e o Método de Simulação de Monte Carlo são amplamente utilizadas para estimar a probabilidade de falha de estruturas submetidas a incêndios (Ricardo e Gomes, 2021).

Uma abordagem amplamente utilizada para avaliar a resistência residual de elementos estruturais de madeira expostos ao fogo é o método da seção reduzida. Esse método considera a perda de material devido à carbonização da madeira, assumindo que a seção transversal resistente diminui progressivamente conforme o tempo de exposição ao fogo. A avaliação é feita com base na profundidade da camada carbonizada e em uma zona de transição afetada pelo calor, onde as propriedades mecânicas da madeira são significativamente reduzidas. Esse procedimento, recomendado por normas internacionais como a *Eurocode 5* (CEN, 2004), permite estimar a capacidade de carga residual dos elementos estruturais e é frequentemente empregado em estudos de confiabilidade estrutural de vigas de madeira sob incêndio Cheung *et al.* (2012).

Estudos como Garcia-Castillo *et al.* (2022), apresentam estudos acerca da confiabilidade estrutural, no qual esse trata-se de uma compilação de dados sobre a resistência à compressão e à tração da madeira em altas temperaturas e propuseram uma modelagem probabilística para prever fatores de redução para projetos contra incêndio. Os dados incluíram madeiras em temperaturas de 20°C a 300°C, revelando grande dispersão e conservadorismo nas normas

européias atuais. Os modelos sugeridos podem ser implementados em códigos numéricos, facilitando abordagens analíticas e computacionais para o projeto seguro de estruturas de madeira.

A otimização estrutural é o processo de busca pela melhor concepção de uma estrutura, visando atingir um determinado objetivo, como a minimização de custos ou a maximização de desempenho, respeitando restrições que muitas vezes são conflitantes (Beck, 2019). No contexto de incêndio, essa otimização deve levar em conta não apenas a resistência mecânica em condições normais, mas também a capacidade da estrutura de suportar o fogo por tempo suficiente para garantir a segurança dos ocupantes e permitir ações eficazes de combate ao incêndio.

Na área da otimização estrutural, o estudo de Moraes et al. (2024) se destaca por apresentar uma revisão abrangente sobre a otimização de estruturas de madeira, explorando diferentes esquemas e abordagens estruturais. Entre os trabalhos analisados, cita-se o de Jelušič e Kravanja (2017), que examina a otimização do projeto de vigas de piso de madeira, considerando fatores como os custos de autoconstrução e os tamanhos discretos da estrutura, contribuindo para o avanço da área.

Apesar desses avanços, existe uma lacuna na literatura quanto à comparação da confiabilidade estrutural de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas para incêndio, especialmente em relação ao tempo que cada tipo de viga pode resistir ao fogo. A otimização do projeto estrutural é uma técnica que visa melhorar o desempenho de vigas, considerando tanto a resistência mecânica quanto a segurança contra incêndios. No entanto, ainda não está claro como essa otimização afeta a confiabilidade em situações de incêndio prolongado.

Portanto, este estudo busca contribuir para o entendimento do comportamento estrutural de vigas de madeira em situações de incêndio, considerando a crescente adoção desse material em projetos sustentáveis. A ausência de diretrizes normativas específicas no Brasil para a segurança contra incêndios em estruturas de madeira reforça a necessidade de investigações detalhadas sobre sua confiabilidade estrutural. Dessa forma, a análise probabilística associada à otimização estrutural torna-se essencial para garantir um projeto seguro e ótimo.

As principais contribuições deste trabalho incluem o aprofundamento da análise da confiabilidade estrutural de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas sob condições de incêndio, além da aplicação do método da seção reduzida para estimar sua resistência residual. Os resultados obtidos poderão auxiliar no desenvolvimento de metodologias de projeto mais precisas, promovendo soluções que conciliam segurança estrutural e sustentabilidade em edificações de madeira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a confiabilidade estrutural de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas em situações de incêndio, utilizando o método da seção reduzida, a fim de desenvolver modelos e diretrizes que assegurem um desempenho seguro e eficiente dessas estruturas sob altas temperaturas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver modelos de otimização que considerem a perda de seção transversal em função do tempo de exposição ao incêndio;
- Investigar o comportamento de vigas de madeira submetido ao modelo de incêndio padronizado, considerando tanto as vigas otimizadas quanto as não otimizadas;
- Avaliar e comparar a confiabilidade estrutural de vigas de madeira através de métodos probabilísticos (MCS e FORM);
- Identificar os principais fatores que influenciam na probabilidade de falha estrutural de viga de madeira em situação de incêndio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Confiabilidade e Otimização de Vigas de Madeira Submetida ao Fogo

Para realizar a análise de confiabilidade e a otimização estrutural de vigas de madeira expostas ao fogo, o primeiro passo essencial é a modelagem do incêndio.

2.1.1 Modelagem do Incêndio

A modelagem do incêndio determina a evolução das temperaturas dos gases e os fluxos de calor por radiação e convecção em um ambiente em chamas, utilizando curvas que descrevem a intensidade do incêndio ao longo do tempo (Hurley & Rosenbaum, 2015). Na análise de estruturas em situação de incêndio, um modelo amplamente utilizado é o das curvas de incêndio padronizado. Essas curvas seguem parâmetros definidos por normas, representando um cenário de incêndio idealizado e permitindo prever como a temperatura se desenvolve ao longo do tempo, fornecendo uma base para avaliar a resistência das vigas de madeira expostas ao fogo.

2.1.1.1 Curvas Padronizadas

As normas técnicas para projetos estruturais permitem o uso de curvas de aquecimento padronizadas obtidas a partir de ensaios laboratoriais, conhecidas como modelo de incêndio padrão. A ABNT NBR 14432 (2000) e o *Eurocode 1* (CEN, 2002) utilizam a curva padrão ISO 834 (1990), que descreve a elevação da temperatura dos gases em função do tempo. Essa curva é expressa pela seguinte Equação 1:

$$\theta_g = \theta_{amb} + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

onde, t é o tempo em minutos, θ_{amb} é a temperatura inicial do ambiente e θ_g é a temperatura dos gases em °C no tempo t .

A curva padrão ISO 834 caracteriza-se por um aumento contínuo da temperatura ao longo do tempo, sem levar em consideração as características específicas do ambiente ou da carga de incêndio. Embora esse modelo seja amplamente utilizado devido à sua simplicidade e normatização, ele fornece uma abordagem idealizada, que pode não representar com precisão as variações reais de um incêndio em diferentes contextos. Contudo, seu uso permanece

prevalente em muitos projetos devido à sua praticidade e à padronização oferecida pelas normas internacionais.

2.2 Otimização Estrutural

A otimização estrutural visa encontrar a melhor configuração de um sistema estrutural para maximizar o desempenho e a eficiência, atendendo a restrições impostas. Na engenharia, essa abordagem é essencial para melhorar a resistência, reduzir o peso e minimizar os custos, mantendo a segurança e a funcionalidade da estrutura (Bendsoe; Sigmund, 2003).

A aplicação da otimização em vigas de madeira expostas ao fogo desempenha um papel fundamental, já que essas vigas, sendo naturalmente combustíveis, exigem projetos cuidadosos que garantam a integridade estrutural durante incêndios. A otimização, nesse contexto, ajusta parâmetros como as dimensões das vigas para garantir que a estrutura tenha o melhor desempenho possível em situações de incêndio, minimizando os riscos de falha estrutural.

Um método amplamente utilizado para otimização em planilhas é o Solver GRG (*Generalized Reduced Gradient*), disponível no Excel, como destacado por Baker (2011). O GRG é recomendado na resolução de problemas de otimização não linear, que são comuns na engenharia estrutural devido à complexidade dos comportamentos dos materiais e das cargas aplicadas. Este método é particularmente útil quando se lida com múltiplas variáveis e restrições, como ocorre na análise de vigas de madeira em condições de incêndio, permitindo encontrar soluções otimizadas com maior eficiência computacional e precisão na modelagem dos comportamentos não lineares.

Além do método GRG, outra ferramenta poderosa disponível para resolver problemas de otimização não linear com restrições é a função *fmincon*, disponível no MATLAB. Conforme destacado por Messac (2015), o *fmincon* é ideal para encontrar a configuração que minimiza uma função objetivo escalar, sujeita a restrições lineares e não lineares. Essa função permite a especificação de limites superiores e inferiores para as variáveis de decisão, além de oferecer diversos algoritmos, como o método de pontos interiores e o método de programação quadrática sequencial (PQS). Isso proporciona grande flexibilidade e eficiência na solução de problemas de otimização, tornando o *fmincon* uma ferramenta essencial para projetos de engenharia, como a análise de vigas de madeira sob condições de incêndio.

A otimização estrutural aplicada a vigas de madeira oferece uma abordagem eficiente e econômica no processo de projeto, garantindo que as vigas não apenas atendam aos requisitos de segurança contra incêndios, mas também maximizem a eficiência no consumo de materiais

e na redução de custos. Esse método é particularmente relevante no contexto da análise de confiabilidade estrutural, onde a otimização pode resultar em melhorias significativas na resistência ao fogo, assegurando um desempenho superior das vigas em situações críticas. Ao ajustar parâmetros como dimensões e distribuição de material, é possível alcançar um equilíbrio ideal entre segurança e economia, essencial em projetos de engenharia estrutural.

2.3 Dimensionamento de Estruturas de Madeira em Situação de Incêndio

No Brasil, ainda não existem normas específicas que tratem do projeto de estruturas de madeira em situação de incêndio. Diante disso, este trabalho adota os critérios estabelecidos pelo *Eurocode 5* (EN 1995-1-2), uma referência normativa amplamente utilizada na Europa para o dimensionamento de estruturas de madeira expostas ao fogo. A Parte 1-2 do *Eurocode 5* apresenta um método simplificado, conhecido como método da seção transversal reduzida, que será considerado no desenvolvimento deste estudo.

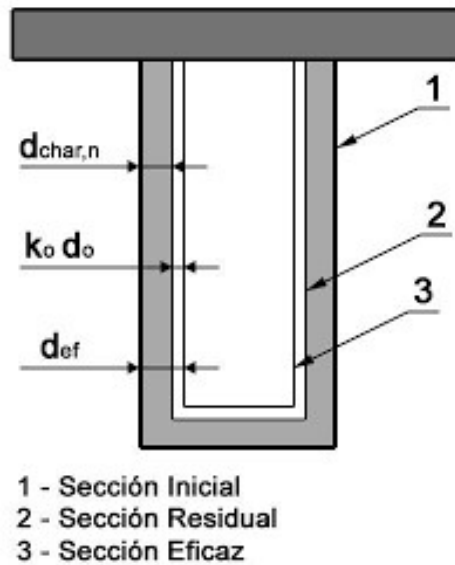
2.3.1 Método da Seção Transversal Reduzida

Um dos métodos mais utilizados e recomendados pelo *Eurocode 5* (EN 1995-1-2) é o método da seção transversal reduzida, que calcula a resistência da madeira em situação de incêndio com base na redução da seção efetiva da peça devido à carbonização.

A carbonização da madeira é o processo no qual a camada exposta ao fogo se transforma em resíduo carbonizado, perdendo completamente sua capacidade de resistir a esforços mecânicos. Dessa forma, apenas a seção residual – a parte da madeira que não foi afetada pelo fogo – é considerada nos cálculos estruturais. Essa abordagem permite determinar a capacidade de carga de elementos de madeira em diferentes cenários de exposição ao fogo, oferecendo um método eficiente e prático para verificar a segurança estrutural.

A Figura 1 ilustra a representação esquemática das seções da madeira segundo o método da seção transversal reduzida, destacando: (1) a seção inicial, (2) a seção residual e (3) a seção eficaz, bem como as profundidades de carbonização utilizadas nos cálculos.

Figura 1 - Representação esquemática das seções na madeira segundo o método da seção transversal reduzida



Fonte: Eurocode 5 (2004)

O método utiliza como base a taxa de carbonização, que varia de acordo com as propriedades do material e as condições de exposição ao fogo. O *Eurocode 5* especifica duas taxas principais: a taxa de carbonização básica (β_0) e a taxa de referência de projeto (β_n). A profundidade da camada carbonizada ($d_{char,0}$) é calculada pela Equação 2:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (2)$$

onde t representa o tempo de exposição ao fogo. Para incorporar os efeitos do arredondamento nos cantos da seção transversal, calcula-se a profundidade virtual de carbonização ($d_{char,n}$), conforme a Equação 3, e, em seguida, a profundidade efetiva (d_{ef}), conforme a Equação 4:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (3)$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (4)$$

Aqui, d_0 é um parâmetro fixo, igual a 7 mm, e k_0 é um fator que considera a influência do tempo de exposição ao fogo no arredondamento dos cantos da seção. Conforme definido pela norma, o valor de k_0 é dado pela relação:

$$k_0 = \frac{t}{20}, \text{ se } t < 20 \text{ min}; \quad k_0 = 1, \text{ se } t \geq 20 \text{ min} \quad (5)$$

Essa consideração reflete que, para tempos curtos de exposição ao fogo, o efeito do arredondamento dos cantos é proporcional ao tempo, enquanto, para tempos maiores, esse efeito é limitado e constante.

Além disso, o *Eurocode 5* estabelece condições para determinar a menor dimensão da seção (b_{min}) em função da profundidade carbonizada. Para seções maiores ou menores que b_{min} , diferentes taxas de carbonização podem ser aplicadas. Essas relações são definidas pelas seguintes Equações 6 e 7:

$$b_{min} = 2 \cdot d_{char,0} + 80 \quad \text{se } d_{char,0} \geq 13 \text{ mm} \quad (6)$$

$$b_{min} = 8,15 \cdot d_{char,0} \quad \text{se } d_{char,0} < 13 \text{ mm} \quad (7)$$

Essas equações ajudam a determinar se o arredondamento nos cantos devido à carbonização deve ser considerado e qual taxa de carbonização é mais adequada para o cálculo da seção reduzida.

No cálculo da resistência e rigidez da seção reduzida, o método considera que as propriedades da madeira não afetada pelo fogo permanecem inalteradas. O coeficiente de modificação para incêndio ($k_{mod,fi}$) é um fator que ajusta as propriedades de resistência da madeira sob condições de fogo. No entanto, no método da seção transversal reduzida, assume-se $k_{mod,fi} = 1$, o que implica que as propriedades da madeira na seção residual são consideradas constantes e iguais às propriedades em condições normais. Essa simplificação torna os cálculos mais práticos, mas assume que a parte não carbonizada da madeira não sofre degradação significativa sob temperaturas elevadas.

2.4 Ferramenta Computacional *Risk Tool* (RT)

A ferramenta computacional Risk Tool (RT), desenvolvida por Mahsuli e Haukaas (2013), é uma plataforma poderosa amplamente utilizada em análises de confiabilidade estrutural. O RT é projetado para realizar análises probabilísticas com alta precisão, permitindo a integração com programas de elementos finitos para análises mais detalhadas. Ele é amplamente utilizado para avaliar a probabilidade de falha de estruturas sob diversas condições de carga e eventos extremos, como incêndios. Entre os métodos disponíveis no RT, destacam-se o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e a Simulação de Monte Carlo (MCS).

No contexto de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas em situação de incêndio, o RT permite uma avaliação detalhada da performance estrutural, considerando incertezas associadas às propriedades térmicas e mecânicas da madeira, à taxa de carbonização, e às condições de carga. Além disso, o RT possibilita a definição de funções de estado limite que incorporam não apenas a resistência mecânica, mas também os efeitos térmicos e geométricos, como a redução de seção devido à carbonização. Essa abordagem garante que as análises

probabilísticas reflitam de maneira mais realista as condições de incêndio, permitindo que decisões de projeto sejam tomadas com maior segurança e embasamento técnico.

Combinando eficiência computacional e flexibilidade, o RT se apresenta como uma ferramenta indispensável para análises avançadas de confiabilidade estrutural, destacando-se em aplicações que exigem a integração de modelagem probabilística com análise de desempenho estrutural em cenários extremos.

2.4.1 Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM)

O Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) é amplamente utilizado na análise probabilística da segurança estrutural, sendo uma ferramenta interessante para a estimativa da probabilidade de falha em sistemas de engenharia. Esse método é baseado na transformação das variáveis aleatórias envolvidas no problema estrutural para um espaço normal padrão, por meio da transformação de Rosenblatt ou do modelo de Nataf, conforme apresentado por Beck (2014). Após essa transformação, o FORM busca identificar o ponto mais provável de falha, conhecido como ponto de projeto, que corresponde à posição mais próxima da fronteira de falha no espaço normal padrão.

Esse ponto é obtido por meio de um problema de otimização, no qual se minimiza a distância entre a origem e a superfície de estado limite, definida como $g(X) = 0$, em que X representa o vetor de variáveis aleatórias. A distância mínima obtida, conhecida como índice de confiabilidade β , é uma medida da segurança estrutural. Quanto maior o valor de β , menor é a probabilidade de falha associada ao sistema estrutural.

Um dos principais atrativos do FORM é sua eficiência computacional, especialmente quando comparado à Simulação de Monte Carlo, já que ele exige menor quantidade de avaliações da função de estado limite. Isso se torna particularmente vantajoso em problemas complexos, nos quais as análises numéricas são custosas. Entretanto, sua precisão depende da linearidade da superfície de estado limite na vizinhança do ponto de projeto. Em situações em que a superfície é altamente não linear, o método pode apresentar resultados imprecisos, sendo necessário recorrer a técnicas de segunda ordem, como o SORM, ou métodos baseados em simulação.

Além do índice de confiabilidade β , o FORM permite calcular os coeficientes de sensibilidade, que indicam a influência de cada variável aleatória sobre a probabilidade de falha. Esses coeficientes auxiliam os engenheiros a identificarem quais variáveis têm maior impacto

na segurança estrutural e, portanto, devem ser controladas com maior rigor durante o processo de projeto e execução.

No contexto da análise de vigas de madeira em situação de incêndio, o FORM possibilita a consideração das incertezas associadas às propriedades dos materiais, à taxa de carbonização e às cargas atuantes, permitindo uma avaliação mais precisa da segurança estrutural dessas vigas ao longo do tempo de exposição ao fogo. Essa abordagem se mostra relevante em virtude da ausência de normas específicas no Brasil para estruturas de madeira em situação de incêndio, destacando-se como uma ferramenta fundamental para a implementação de projetos que conciliem segurança e eficiência estrutural (Beck, 2014).

2.4.2 Método de Simulação de Monte Carlo

O Método de Simulação de Monte Carlo (MCS) é amplamente reconhecido como uma ferramenta poderosa para a análise de problemas probabilísticos e de confiabilidade estrutural. Fundamentado na geração de amostras aleatórias para variáveis de entrada, o método permite modelar sistemas complexos e estimar distribuições de saída, como a probabilidade de falha ou o desempenho estrutural de um sistema em condições específicas. Esse método é particularmente eficaz em situações onde a complexidade do modelo ou as incertezas tornam as soluções analíticas inviáveis (Liu et al., 2021).

O MCS tem sido aplicado de forma crescente em análises envolvendo materiais e estruturas em condições extremas. Por meio da simulação repetida de diferentes cenários, o método possibilita a avaliação de sistemas submetidos a incertezas em variáveis como cargas, propriedades materiais e condições ambientais. Para sistemas estruturais, o método se destaca por fornecer estimativas robustas mesmo em situações com forte acoplamento não linear entre variáveis (Liu et al., 2021).

No caso específico de vigas de madeira em situação de incêndio, o Método de Monte Carlo desempenha um papel central na análise probabilística de confiabilidade. Considerando que a madeira apresenta variabilidade em suas propriedades térmicas e mecânicas, como a taxa de carbonização e a resistência residual, o MCS permite incorporar essas incertezas de maneira sistemática. Além disso, a simulação computacional facilita a compreensão do comportamento estrutural das vigas ao longo do tempo de exposição ao fogo, avaliando a probabilidade de falha para diferentes condições de projeto.

Por meio de simulações com base em propriedades probabilísticas, como as distribuições das cargas permanentes e variáveis, e as condições térmicas impostas pelo

incêndio, o MCS fornece informações detalhadas sobre a confiabilidade estrutural. Esse método também permite explorar diferentes cenários de otimização, avaliando o impacto de alterações na geometria da viga, como altura e base, sobre a resistência ao fogo.

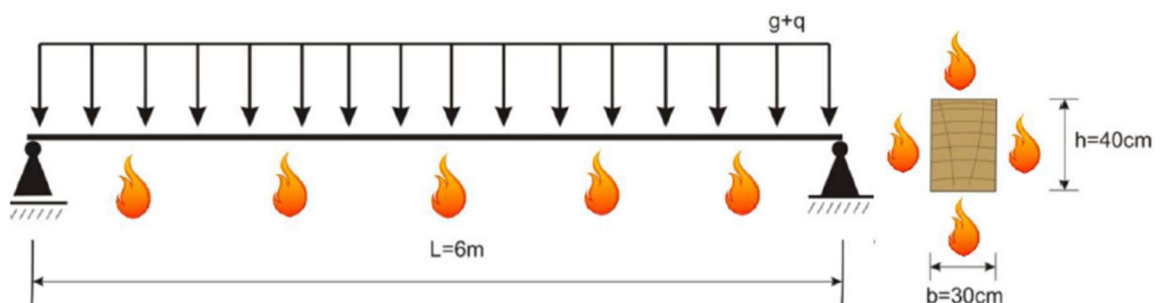
3 METODOLOGIA

A presente seção deste trabalho descreve os métodos utilizados para a análise da viga de madeira em situação de incêndio, tomando como base o problema apresentado por Cheung *et al.* (2012).

3.1 Descrição do problema

A viga de madeira estudada possui comprimento $L = 6$ m, sendo considerada simplesmente apoiada, isostática e submetida a uma carga distribuída. A carga aplicada consiste em parcelas de carga permanente (g) e variável (q) com valores nominais de 10 kN/m e 25 kN/m, respectivamente. A viga é composta por madeira de *Eucalypto Citriodora*, com resistência média à compressão paralela às fibras de 6,2 kN/cm² e módulo de elasticidade de 2067 kN/cm². A viga está sujeita a condições normais de uso e a uma situação de incêndio, onde é exposta ao fogo em quatro faces, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Geometria do problema



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

As dimensões de projeto da seção transversal da viga são de 30 cm de largura (b) e 40 cm de altura (h). Em situações normais, a viga é verificada quanto às tensões normais e deformações excessivas. Durante a exposição ao fogo, a taxa de carbonização da madeira é considerada uma variável aleatória, influenciando a resistência residual da seção transversal. A taxa de carbonização média adotada é de 0,6 mm/min, conforme ensaios experimentais conduzidos por Pinto (2005).

Diferentemente do artigo de Cheung *et al.* (2012), onde o problema é analisado para um tempo fixo (T) de 60 minutos e dimensões constantes, o presente estudo aborda a solução do problema considerando diferentes valores de tempo de incêndio e de dimensões da viga.

3.2 Informações sobre a análise da confiabilidade do problema

A análise de confiabilidade foi conduzida utilizando o *software* de confiabilidade estrutural Rt (*Risk Tools*) disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de British Columbia, Vancouver-Canadá (Mahsuli e Haukaas, 2013), empregando os métodos de Simulação de Monte Carlo (MCS) e FORM (*First Order Reliability Method*). Foram consideradas 200.000 simulações como base de iteração para o cálculo da probabilidade de falha.

Para a análise de confiabilidade estrutural, foram empregadas três equações de estado limite: tensões normais em condições normais (Equação 8), tensões normais sob condição de incêndio (Equação 9) e deformação em condições normais (Equação 10). Para considerar as incertezas nos modelos analíticos de determinação de tensões e efeitos de cargas, foram introduzidos dois parâmetros: θ_R e θ_E .

A Equação 9, que representa o modo de falha devido a tensões normais sob condição de incêndio, considera o método da seção transversal reduzida. Este método constitui a via mais simples para a verificação da segurança ao fogo e é o procedimento recomendado pelo EN1995-1-2 (1995). Nele, a verificação da capacidade resistente é conduzida com base nos valores de cálculo das propriedades mecânicas determinados segundo as regras apresentadas pelo *Eurocode 5*.

Modo de falha devido às tensões normais (temperatura ambiente):

$$g_1 = \theta_R \cdot f_{co} - \theta_E \cdot \frac{(g + q)L^2}{8} \cdot \frac{1}{\left(\frac{b \cdot h^2}{6}\right)} \quad (8)$$

Modo de falha devido às tensões normais na seção residual sob condição de incêndio:

$$g_2 = \theta_R \cdot f_{co} - \theta_E \cdot \frac{(g + q)L^2}{8} \cdot \frac{1}{\left((b - 2 \cdot \alpha \cdot T) \cdot \left(\frac{(h - 2 \cdot \alpha \cdot T)^2}{6}\right)\right)} \quad (9)$$

Modo de falha por deformação excessiva em condições normais (temperatura ambiente):

$$g_3 = \frac{L}{200} - \frac{5 \cdot (g + q) \cdot L^4}{384} \cdot \frac{1}{\left(E_{co} \cdot \left(\frac{(b \cdot h^3)}{12}\right)\right)} \quad (10)$$

onde: g é o carregamento permanente; q é o carregamento variável; f_{co} representa a resistência à compressão paralela às fibras; E_{co} é o Módulo de Elasticidade; α é a taxa de carbonização; θ_E é o parâmetro de incerteza do efeito da ação; e θ_R é o parâmetro de incerteza da resistência.

Os modelos probabilísticos são definidos pelos seus valores característicos, que são usados para determinar os valores das ações de projeto. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros probabilísticos empregados para as variáveis básicas do estudo.

Tabela 1 - Parâmetros das variáveis aleatórias do problema. (Adaptado de Cheung et al. (2012))

Categoria da Variável	Variável	Símbolo	Unid.	Distribuição	Média	Desvio
Ações	Permanente	g	KN/cm	Normal	0,10	$0,2 \times média$
	Variável	q	KN/cm	Gumbel	0,25	$0,25 \times média$
	Taxa de Carbonização	α	cm/min	Lognormal	0,06	$0,167 \times média$
Propriedades	Módulo de Elasticidade	E_{co}	KN/cm^2	Lognormal	2067	$0,128 \times média$
	Resistência Paralela às fibras	f_{co}	KN/cm^2	Lognormal	6,2	$0,103 \times média$
Modelos de incertezas	Efeito das ações	θ_E	-	Normal	1,0	$0,1 \times média$
	Efeito da resistência	θ_R	-	Normal	1,1	$0,0909 \times média$

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 Informações sobre a otimização do problema

A otimização do problema foi realizada utilizando os programas MATLAB e Excel. No Excel, a ferramenta solver (que utiliza o método GRG não-linear) foi usada para gerar uma contraprova da otimização principal realizada no MATLAB. No MATLAB, foi utilizada a função *fmincon* (que utiliza o método *interior point*) da aba de ferramentas próprias do programa, considerando os limites geométricos de altura (h) e largura (b). A combinação dessas ferramentas possibilitou a validação dos resultados por meio de diferentes algoritmos, assegurando maior precisão e confiabilidade na determinação das dimensões otimizadas da viga.

3.3.1 Formulação do Problema de Otimização

A formulação do problema de otimização seguiu as seguintes etapas:

1. **Descrição do Problema:** Estabeleceu-se os objetivos gerais do projeto e os requisitos a serem atendidos. O objetivo definido foi reduzir o volume da viga, considerando certas condições de projeto e restrições.
2. **Coleta de Dados e Informações:** Coletou-se informações sobre as propriedades do material, requisitos de desempenho, entre outros dados necessários para desenvolver a formulação matemática do problema.
3. **Definição de Variáveis de Projeto:** As variáveis de projeto consideradas foram a largura (b) e a altura (h) da viga, com limites geométricos de 0,05 a 5 m para a altura e de 0,1 a 5 m para a largura. Os limites geométricos foram estabelecidos conforme os seguintes critérios: o limite mínimo seguiu as recomendações normativas para garantir uma seção estrutural mínima segura, enquanto o limite máximo foi definido em 5 m, um valor adotado arbitrariamente para manter a viabilidade computacional do processo de otimização.
4. **Critério de Otimização:** O critério de otimização foi estabelecido por meio de uma função escalar, formulada a partir das variáveis de projeto da viga. Essa função, conhecida como função objetivo ou função custo, representa a grandeza a ser minimizada dentro das restrições impostas pelo problema. No presente estudo, a função objetivo corresponde ao volume da viga de madeira, sendo sua minimização essencial para otimizar o uso de material, reduzindo o desperdício sem comprometer a resistência estrutural.
5. **Formulação das Restrições:** As restrições foram formuladas para assegurar que a viga não falhe tanto sob cargas operacionais normais quanto em situação de incêndio, conforme estabelecido pelas equações de estado limite g_1 , g_2 e g_3 (Equações de 8 a 10). Essas restrições são diretamente influenciadas pelas variáveis de projeto (b e h), cujos valores variam conforme diferentes condições de ensaio. Além disso, foram considerados limites geométricos, garantindo que as dimensões da viga permaneçam dentro de parâmetros viáveis para fabricação e desempenho estrutural adequado.

No processo de otimização, a viga foi considerada com um comprimento de 6 m, adotando-se uma taxa de carbonização de 0,06 cm/min e um tempo de incêndio (T) variável entre 0 e 120 minutos. Para a determinação dos valores de carga permanente, carga variável e

resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), foram levados em conta os valores médios, desvio padrão e o tipo de distribuição probabilística dessas variáveis, garantindo uma modelagem mais realista e alinhada com a análise de confiabilidade estrutural.

3.3.2 Parâmetros Utilizados

- **Resistência à Compressão Paralela às Fibras (f_{c0}):**
 - Média: 6,2 kN/cm²
 - Valor característico (f_k): Calculado como $f_k = f_{c0} \times f_{ik}$, onde $f_{ik} = 0,8445$ para uma distribuição lognormal com coeficiente de variação (CV) de 0,1 (Beck, 2014). Portanto, $f_k = 0,8445 \times 6,2 = 5,2359$ kN/cm² = 52.359.000 N/m² (com confiança de 95%).
- **Carga Permanente (g):**
 - Média: 0,1 kN/cm
 - Valor característico (g_k): Calculado como $g_k = \text{média} \times f_{ik}$, onde $f_{ik} = 1,329$ para uma distribuição normal com CV de 0,2 (Beck, 2014). Portanto, $g_k = 1,329 \times 0,1 = 0,1329$ kN/cm = 13290 N/m (com confiança de 95%).
- **Carga Variável (q):**
 - Média: 0,25 kN/cm
 - Valor característico (q_k): Calculado como $q_k = \text{média} \times f_{ik}$, onde $f_{ik} = 1,4665$ para uma distribuição Gumbel com CV de 0,25 (Beck, 2014). Portanto, $q_k = 1,4665 \times 0,25 = 0,366625$ kN/cm = 36662,5 N/m (com confiança de 95%).

A Tabela 2 apresenta um resumo do processo de otimização, consolidando os parâmetros mencionados anteriormente e detalhando as variáveis de projeto, critérios de otimização e restrições adotadas. Esses elementos foram considerados para garantir a segurança da viga de madeira tanto em condições normais de uso quanto em situação de incêndio, assegurando um equilíbrio entre eficiência estrutural e confiabilidade.

Tabela 2 - Resumo do Processo de Otimização

1. VARIÁVEIS DE PROJETO					
Variável	Limite Inferior	Valor inicial de Projeto	Limite Superior	Símbolo	Unidade
Altura da Seção	0,05	0,4	5	h	m
Largura da Seção	0,1	0,3	5	b	m
2. PARÂMETROS					
Parâmetro			Valor	Símbolo	Unidade
Comprimento do vão			6,00	L	m
Carga Permanente			13290	g	N/m
Carga Variável			36662.5	q	N/m
Resistência à compressão paralela as fibras			52359000	f_{c0}	N/m^2
Taxa de carbonização			0,0006	α	m/min
Tempo de incêndio			0 – 120	T	min
3. FUNÇÃO OBJETIVO					
Volume do material			Valor	Símbolo	Unidade
a ser minimizado			x	V	m^3
4. RESTRIÇÕES					
Modo de falha			Lado Esquerdo	$\leq$ ou $\geq$	Lado Direito
devido às tensões normais (temperatura ambiente):			g_1 (Equação 8)	$\geq$	0
devido às tensões normais na seção residual sob condição de incêndio			g_2 (Equação 9)	$\geq$	0
Devido a deformação excessiva em condições normais (temperatura ambiente)			g_3 (Equação 10)	$\geq$	0
Altura da Seção			h	$\geq$	0,05 m
Largura da Seção			b	$\geq$	0,10 m
Altura da Seção			h	$\leq$	5,00 m
Largura da Seção			b	$\leq$	5,00 m

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da avaliação da confiabilidade de vigas de madeira otimizadas e não otimizadas em situação de incêndio, utilizando a simulação de Monte Carlo e o FORM. As análises referentes ao problema focaram em três cenários principais: incêndio com durações variando de 30 a 120 minutos, condições normais de uso, e situações de possíveis deformações excessivas.

Inicia-se a avaliação dos resultados pela análise das dimensões otimizadas da viga, pois as alterações dimensionais são fundamentais para entender a resposta estrutural sob incêndio.

4.1 Avaliação das Dimensões Otimizadas para Diferentes Tempos de Incêndio

A viga, com comprimento fixo de 6 metros, foi otimizada considerando a equação de estado limite, que modela o modo de falha devido às tensões normais na seção residual sob condição de incêndio. Na avaliação das dimensões otimizadas, observou-se uma adaptação estratégica das dimensões base e altura para maximizar a confiabilidade estrutural em situação de incêndio. Em comparação com as dimensões de projeto (viga não otimizada), observa-se que a otimização focou na minimização do risco de falha estrutural, priorizando o aumento da altura da viga em detrimento da base. Este enfoque deve-se ao fato de que a altura tem uma contribuição significativamente maior na resistência à flexão segundo a equação de estado limite (Equação 9). A Tabela 3 resume as dimensões otimizadas da viga para suportar os diferentes tempos de incêndio.

Tabela 3 - Dimensões otimizadas da viga de madeira para suportar diferentes tempos de exposição ao fogo

<i>Otimizada para suportar o tempo de incêndio (min) de:</i>	Seção transversal $b(cm) \times h(cm)$	Área (m^2)	Volume (m^3)
0	10 × 59	0,0590	0,3540
30	14 × 63	0,0882	0,5292
60	17 × 66	0,1122	0,6732
90	21 × 70	0,1470	0,8820
120	24 × 74	0,1776	1,0656
viga não otimizada/dimensões de projeto	30 × 40	0,1200	0,7200

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se na Tabela 3 que a viga quando otimizada apresentou um aumento linear (de 3 a 4 cm a cada 30 min acrescido) tanto na base quanto na altura, com um crescimento mais acentuado da altura, à medida que aumentou-se o tempo de incêndio. Este aumento busca melhorar a integridade estrutural da viga ao prolongar o tempo de exposição ao fogo, levando em consideração a formação de uma camada carbonizada que atua como isolante térmico e protege a seção interna da madeira. A maior altura proporciona maior momento de inércia, fundamental para suportar cargas maiores e resistir melhor à flexão sob condições de incêndio.

Os resultados apresentados na Tabela 3 destacam a importância da escolha cuidadosa das dimensões em vigas de madeira, onde a otimização das vigas não apenas pode garantir uma segurança adequada para a uma situação de incêndio, mas também contribuir para redução da quantidade de madeira necessária para atingir o mesmo ou até um melhor nível de performance estrutural.

Os resultados da otimização mostram uma economia significativa de material (até 60 min de incêndio) quando comparados com as dimensões da viga não otimizada. A otimização das dimensões para uma exposição ao fogo superior a 60 minutos resultou em uma viga com volumes maiores do que o projeto original. Embora à primeira vista pareça um aumento, é fundamental observar que esse volume adicional de madeira não representa desperdício, mas sim uma estratégia eficiente para garantir a integridade estrutural. A otimização focou em aumentar a altura, que tem maior impacto na resistência à flexão e na capacidade da viga de manter sua integridade estrutural sob incêndio, sem aumentar proporcionalmente a base. Este enfoque reduz a quantidade de material necessário para suportar cargas sob condições normais, promovendo um uso mais eficiente da madeira.

4.2 Análise da Probabilidade de Falha sob Condições Normais de Temperatura

A viga de madeira otimizada para a situação de incêndio, foi analisada sob condições normais de temperatura, utilizando os métodos de Monte Carlo e FORM. A análise focou em dois modos de falha distintos: g_1 , relacionado às tensões normais (Equação 8), e g_3 , que considera a deformação excessivas (Equação 10). A otimização das dimensões da seção transversal da viga foi projetada para melhorar a resposta estrutural em caso de incêndio, porém, neste cenário, avaliou-se o desempenho em ambiente sem incêndio.

A Tabela 4 apresenta as probabilidades de falha para as diferentes dimensões de seção transversal otimizadas.

Tabela 4 - Probabilidade de falha para diferentes dimensões de seção transversal sob condições normais de temperatura

<i>Otimizada para suportar o tempo de incêndio (min) de:</i>	Seção transversal b(cm)×h(cm)	P_f(%)- Monte Carlo (g_1)	P_f(%) - Monte Carlo (g_3)	P_f(%) - FORM (g_1)	P_f(%) - FORM (g_3)
0	10 × 59	0,0300	0,5830	0,0256	0,5500
30	14 × 63	0,0000257	0,000365	0,0000255	0,00037
60	17 × 66	0	0	0	0
90	21 × 70	0	0	0	0
120	24 × 74	0	0	0	0
viga não otimizada/dimensões de projeto	30 × 40	0,000284	1,1965	0,000283	1,1000

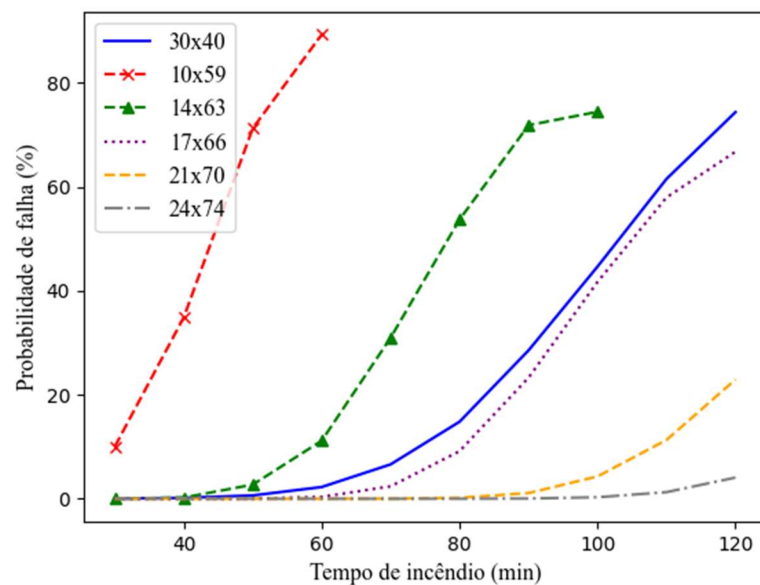
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que a viga não otimizada (30 × 40 cm) e a viga otimizada, mas que não considera a ocorrência de um incêndio (dimensão 10 × 59 cm), apresentaram probabilidades de falha para tensões normais e, principalmente, para deformação excessiva, inferiores ou iguais a 1,1965%, com destaque para o modo de falha por deformação. Por outro lado, outras dimensões de seções transversais apresentaram probabilidades de falha extremamente baixas, inferiores a 0,0004%, como na seção 14 × 63 cm, que apresentou 0,000257% para tensões normais (g_1) e 0,000365% para deformações (g_3), ou nulas para ambos os modos nas seções otimizadas para 60, 90 e 120 minutos. Isso sugere que as otimizações de dimensões para cenários de incêndio também podem beneficiar significativamente o desempenho estrutural em condições normais de temperatura. Os resultados sugerem que a otimização das dimensões da viga não apenas prepara a estrutura para resistir em cenários extremos de incêndio, mas também, melhora a segurança sob condições de uso regular. Este fato pode ser atribuído à maior rigidez e resistência estrutural fornecida pelas seções transversais ampliadas, que resistem melhor às cargas aplicadas mesmo sem a presença de altas temperaturas. Portanto, a abordagem de otimizar vigas para condições de incêndio prova ser benéfica mesmo quando o incêndio não ocorre, oferecendo uma margem de segurança adicional sob condições normais de utilização.

4.3 Análise da Probabilidade de Falha em Situação de Incêndio

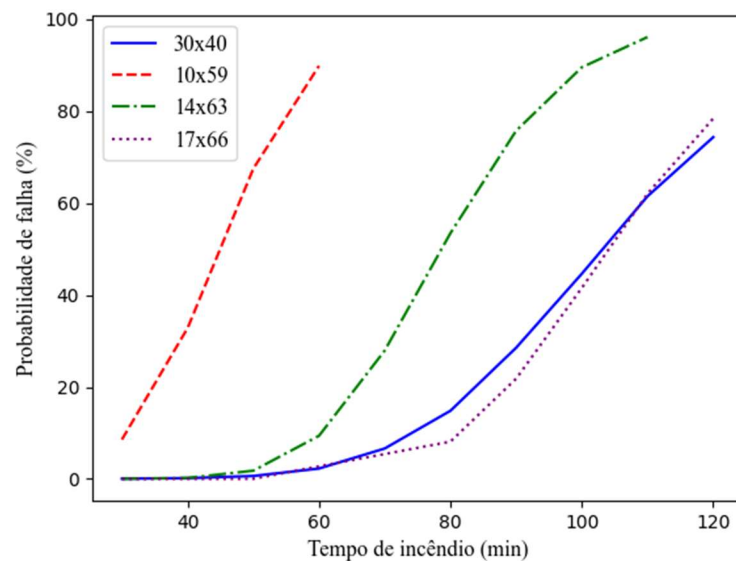
Neste tópico, analisa-se a confiabilidade da viga de madeira otimizada para diferentes durações de exposição ao incêndio, comparando-as com vigas não otimizadas com dimensões padrão de 30×40 cm. As análises foram realizadas usando dois métodos distintos de avaliação de confiabilidade: o método de Monte Carlo e o FORM, cujos resultados são ilustrados, respectivamente, nos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Gráfico $P_f \times$ tempo (min) em função da seção transversal – Monte Carlo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Gráfico 2 - Gráfico $P_f \times$ tempo (min) em função da seção transversal – FORM



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os Gráficos 1 e 2 apresentam as probabilidades de falha em função do tempo para vigas otimizadas para suportar incêndios de 0, 30, 60, 90 e 120 minutos, em comparação com uma configuração não otimizada de 30×40 cm. Alguns resultados obtidos pelo método FORM são limitados devido à não convergência do método em tempos superiores, um reflexo das limitações deste método ao enfrentar as não linearidades e complexidades emergentes do comportamento estrutural sob incêndio prolongado.

Inicialmente, a viga otimizada apenas para condições normais (otimizada para suportar 0 minutos de incêndio) com dimensões de 10×59 cm mostrou uma alta probabilidade de falha, excedendo 10% aos 30 minutos e quase 90% aos 60 minutos de incêndio. Essa elevada probabilidade indica que, apenas otimizando e sem considerar um possível incêndio, tais dimensões não são adequadas para suportar elevadas temperaturas por um tempo prolongado. Em contraste, as vigas otimizadas para suportar de 30 a 120 minutos de incêndio demonstraram uma diminuição progressiva na probabilidade de falha em comparação com a configuração não otimizada, evidenciando uma melhoria significativa na resistência ao fogo.

Especificamente, a viga otimizada para suportar 60 minutos de incêndio (seção 17×66 cm) apresentou probabilidades de falha ligeiramente menores, que a viga não otimizada (seção 30×40 cm). Para vigas otimizadas para suportar os tempos de incêndio de 90 e 120 minutos, as probabilidades de falha, conforme avaliadas pelo método de Monte Carlo, foram substancialmente reduzidas. Os resultados específicos da P_f considerando apenas os valores para os quais a viga foi dimensionada, estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Probabilidade de falha para diferentes dimensões de seção transversal em situação de incêndio

<i>Otimizada para suportar o tempo de incêndio (min) de:</i>	Seção transversal $b(cm) \times h(cm)$	P_f (%) para suportar o tempo para o qual foi otimizada - Monte Carlo	P_f (%) para suportar o tempo para o qual foi otimizada - FORM
0	10×59	0,0446826	0,0255659
30	14×63	0,0262796	0,0205704
60	17×66	0,396978	não converge
90	21×70	1,08660	não converge
120	24×74	3,89656	3,51566

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nota-se na Tabela 5 que a viga otimizada para 60 minutos de incêndio (seção 17×66 cm) apresentou uma probabilidade de falha de 0,396978% pelo Método de Monte Carlo, enquanto o método FORM não convergiu para esta e outras configurações, indicando potenciais limitações do método frente a complexidades do modelo. A não convergência do FORM em algumas configurações reforça a necessidade da escolha adequada do método de análise ou das suposições do modelo em situação de incêndio prolongado.

Para tempos de incêndio de 90 e 120 minutos, as vigas otimizadas (seções 21×70 cm e 24×74 cm, respectivamente) mostraram um aumento nas probabilidades de falha conforme o tempo de exposição ao incêndio aumentava, alcançando 1,08660% e 3,89656% pelo Método de Monte Carlo. Apesar do aumento, cabe ressaltar que os valores são aceitáveis dada a condição extrema de um incêndio.

A comparação das probabilidades de falha entre as vigas otimizadas e a não otimizada revela que as otimizações proporcionam uma melhoria significativa na resistência ao incêndio. Especificamente, a viga otimizada para 120 minutos (24×74 cm) apresentou uma redução substancial na probabilidade de falha, em comparação com a viga padrão não otimizada (30 × 40 cm), cuja probabilidade de falha foi de cerca de 74,3639% aos 120 minutos pelo Método de Monte Carlo.

Adicionalmente, para um tempo de exposição ao incêndio de 60 minutos, a viga otimizada (17×66 cm) registrou uma probabilidade de falha de apenas 0,396978%, enquanto a viga padrão não otimizada (30×40 cm) apresentou uma probabilidade de falha de 2,25352% pelo mesmo método. Estudos anteriores corroboram esses achados, Cheung et al. (2012) reportaram uma probabilidade de falha de 2,01% para a viga não otimizada sob condições similares, enquanto Ricardo (2015) reportou um valor de 2,194% para o mesmo cenário.

Os dados detalhados das probabilidades de falha em função do tempo de incêndio e das dimensões da seção transversal são apresentados na Tabela 6. Estas informações também foram utilizadas para a elaboração dos Gráficos 1 e 2, que ilustram as variações das probabilidades de falha ao longo do tempo em diferentes configurações de seção transversal.

Tabela 6 - Probabilidade de falha em função do tempo para diferentes dimensões de seção transversal em situação de incêndio

<i>Submetida a um tempo de incêndio de (min):</i>	Seção transversal b(cm)×h(cm)	P_f(%) - Monte Carlo	P_f(%) FORM
0	30 × 40	0,000284	0,000283
30		0,037586	0,0288734
60		2,25352	1,87855
90		28,5416	26,4795
120		74,3639	73,9268
0	10 × 59	0,0446826	0,0255659
30		10,0176	8,55895
60		89,2825	89,8857
90		100	100
120		100	100
0	14 × 63	0,0000257	0,0000255
30		0,0262796	0,0205704
60		11,1544	9,33738
90		71,8517	75,7704
120		100	100
0	17 × 66	0	0
30		0	0
60		0,396978	não converge
90		23,2865	21,7956
120		66,7387	78,4304
0	21 × 70	0	0
30		0	0
60		0,00103	não converge
90		1,08660	não converge
120		23,1503	21,7200
0	24 × 74	0	0
30		0	0
60		0	não converge
90		0,0412063	não converge
120		4,07492	3,5160

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os resultados da Tabela 6 evidenciam um aumento significativo na probabilidade de falha conforme o tempo de exposição ao incêndio aumenta para todas as configurações de seção transversal. Esse padrão é esperado, dado que a exposição prolongada ao fogo reduz a integridade estrutural do material devido à degradação térmica e perda de resistência mecânica. O Método de Monte Carlo e o FORM mostram resultados consistentes, embora o Monte Carlo geralmente apresente probabilidades de falha ligeiramente superiores. Isso pode ser atribuído ao fato de o Monte Carlo ser menos sensível às suposições de linearidade implicadas pelo FORM e, portanto, potencialmente mais preciso ao capturar complexidades não lineares e extremidades do comportamento estrutural sob fogo. Desse modo, o FORM pode requerer ajustes ou melhorias para lidar adequadamente com as complexidades associadas a incêndios prolongados.

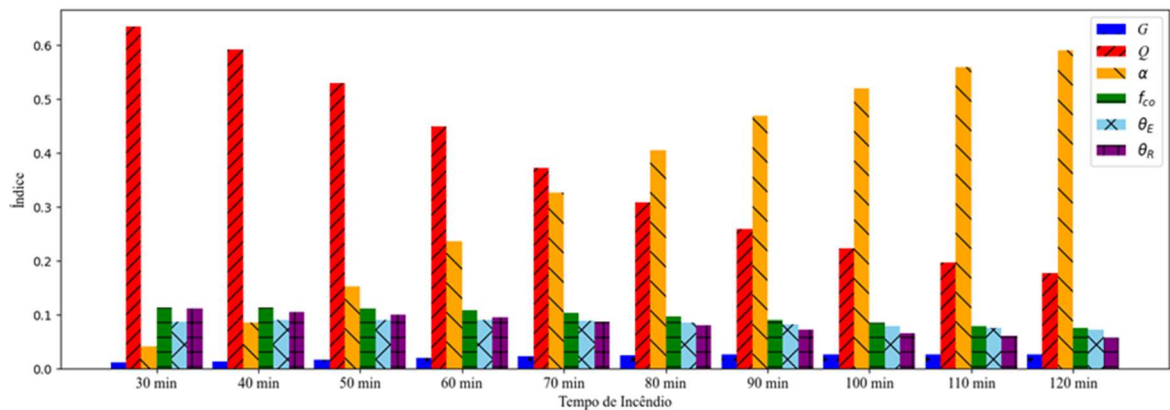
Os resultados indicam que a otimização das dimensões das vigas para especificações de resistência ao fogo pode, além de aumentar a segurança em situação de incêndio, diminuir o custo estrutural. A incorporação de medidas complementares, como revestimentos retardadores de fogo e sistemas de supressão ativa, é também aconselhada para otimizar a segurança geral das estruturas.

4.4 Índices de sensibilidade das variáveis aleatórias no ponto de projeto

Os índices de sensibilidade das variáveis aleatórias foram analisados para a equação de estado limite g_2 , considerando diferentes configurações de seções transversais e variando tempos de incêndio. As Figuras 3 e 4 ilustram essas sensibilidades para seções transversais não otimizadas (30×40 cm) e otimizadas (14×63 cm), respectivamente, cobrindo tempos de incêndio de 30 a 120 minutos.

Nas Figuras apresentadas, o carregamento variável (Q) e a taxa de carbonização (α) surgem como as variáveis que mais contribuem na composição da probabilidade de falha. Especificamente, para a seção transversal não otimizada (30×40 cm), o carregamento variável contribui com 63,4% para a probabilidade de falha aos 30 minutos de incêndio, diminuindo progressivamente até 17,7% aos 120 minutos. Paralelamente, a taxa de carbonização começa com uma contribuição menor de 4,1% aos 30 minutos, aumentando significativamente para 59,1% aos 120 minutos. Este aumento na contribuição da taxa de carbonização reflete a sua crescente importância conforme o incêndio se prolonga, devido ao seu alto coeficiente de variação ($cv = 0,166$) e sua representatividade na equação de estado limite.

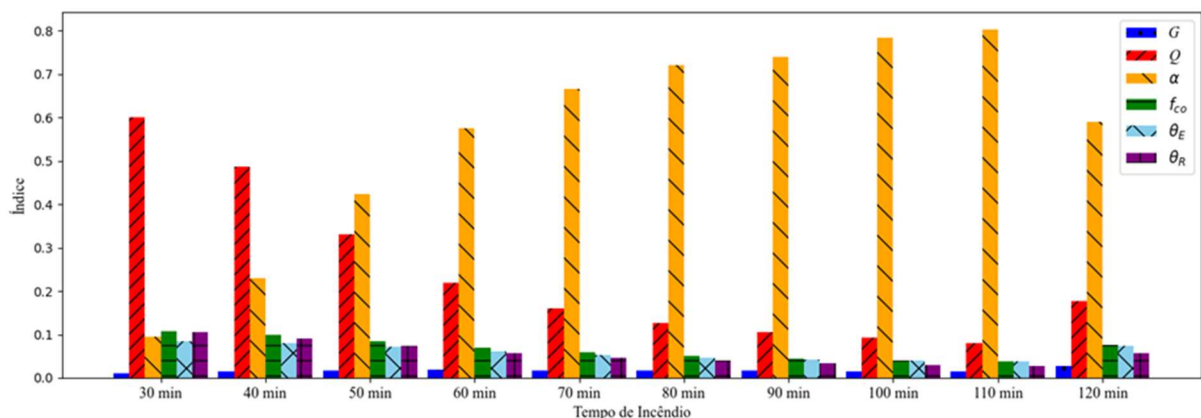
Figura 3 - Índices de sensibilidade para equação de estado limite G2 – Seção transversal não otimizada (30×40 cm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para a seção transversal otimizada (14×63 cm), observa-se um padrão similar na Figura 4. O carregamento variável domina as contribuições iniciais, sendo responsável por 60,0% da probabilidade de falha aos 30 minutos. Com o prolongamento do incêndio, a taxa de carbonização se torna mais relevante, contribuindo com até 80,2% aos 110 minutos de incêndio, indicando uma dependência crescente desta variável nas condições mais severas de incêndio. Os detalhes dessas contribuições são quantificados nas Tabelas 7 e 8, que fornecem uma visão completa dos índices de sensibilidade das variáveis para ambos os tipos de seção transversal ao longo de diferentes durações de incêndio. Estes índices ressaltam que, enquanto algumas variáveis mantêm uma influência quase que constante, outras, como a taxa de carbonização, tornam-se críticas à medida que o incêndio se intensifica.

Figura 4 - Índices de sensibilidade para equação de estado limite G2 – Seção transversal otimizada para suportar 30 minutos de incêndio (14 × 63 cm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 7 - Índices de sensibilidade para seção transversal não otimizada (30×40 cm)

<i>Variáveis Aleatórias</i>		<i>Duração do incêndio (min)</i>									
<i>Nome</i>	<i>Símbolo</i>	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>	<i>70</i>	<i>80</i>	<i>90</i>	<i>100</i>	<i>110</i>	<i>120</i>
Carregamento Permanente	G	0,011	0,014	0,017	0,020	0,023	0,025	0,026	0,027	0,027	0,027
Carregamento Variável	Q	0,634	0,592	0,529	0,450	0,372	0,308	0,259	0,224	0,197	0,177
Taxa de Carbonização	α	0,041	0,085	0,152	0,236	0,326	0,405	0,469	0,520	0,560	0,591
Resistência Paralela às fibras	f_{co}	0,114	0,113	0,111	0,108	0,103	0,097	0,090	0,085	0,079	0,075
Efeito das ações	θ_E	0,088	0,090	0,090	0,090	0,089	0,086	0,082	0,079	0,076	0,073
Efeito da resistência	θ_R	0,111	0,106	0,101	0,095	0,088	0,080	0,073	0,066	0,061	0,057

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)**Tabela 8** - Índices de sensibilidade para seção transversal otimizada para suportar 30 minutos de incêndio (14 × 63 cm)

<i>Variáveis Aleatórias</i>		<i>Duração do incêndio (min)</i>									
<i>Nome</i>	<i>Símbolo</i>	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>	<i>70</i>	<i>80</i>	<i>90</i>	<i>100</i>	<i>110</i>	<i>120</i>
Carregamento Permanente	G	0,011	0,014	0,017	0,018	0,017	0,017	0,016	0,015	0,015	0,027
Carregamento Variável	Q	0,600	0,487	0,330	0,220	0,161	0,127	0,106	0,092	0,081	0,177
Taxa de Carbonização	α	0,094	0,229	0,424	0,576	0,666	0,720	0,740	0,783	0,802	0,591
Resistência Paralela às fibras	f_{co}	0,108	0,099	0,084	0,069	0,058	0,050	0,044	0,040	0,037	0,075
Efeito das ações	θ_E	0,084	0,080	0,071	0,061	0,053	0,047	0,043	0,040	0,037	0,073
Efeito da resistência	θ_R	0,105	0,091	0,073	0,057	0,046	0,039	0,034	0,030	0,027	0,057

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, uma abordagem envolvendo a análise de confiabilidade e otimização estrutural foi empregada para estudar o comportamento de vigas de madeira, otimizadas e não otimizadas, em situação de incêndio. Detalhes sobre a análise de estruturas de madeira submetidas ao fogo, otimização estrutural, confiabilidade estrutural e o método da seção transversal reduzida foram apresentados e discutidos. Em seguida, métodos computacionais foram utilizados e verificados em termos de eficiência e conformidade, considerando abordagens probabilísticas, como a Simulação de Monte Carlo e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM). O método foi aplicado à solução de problemas de confiabilidade estrutural, considerando as incertezas nas propriedades térmicas e mecânicas da madeira, além da variação na taxa de carbonização e na geometria das vigas ao longo do tempo de exposição ao fogo. Também foi investigado o impacto do tempo de incêndio e das dimensões otimizadas das vigas na resistência residual e na segurança estrutural.

Os resultados obtidos indicaram que a otimização das dimensões das vigas resultou em melhorias significativas na integridade estrutural durante o incêndio. Comparadas à viga não otimizada (30×40 cm), as dimensões otimizadas apresentaram um aumento linear na base e altura com o aumento do tempo de exposição ao fogo, priorizando a altura para melhorar a resistência à flexão. As vigas otimizadas apresentaram uma redução expressiva na probabilidade de falha, com destaque para a viga otimizada para 60 minutos (17×66 cm), cuja probabilidade de falha foi de apenas 0,396978% pelo método de Monte Carlo, em contraste com os 22,53% observados na viga não otimizada. Além disso, a análise dos índices de sensibilidade revelou que as variáveis mais influentes na probabilidade de falha foram o carregamento variável (Q) e a taxa de carbonização (α), ressaltando a importância de considerar essas incertezas no processo de otimização.

Com base nos resultados obtidos, que evidenciaram a maior vulnerabilidade das vigas não otimizadas em relação às otimizadas, tanto em condições normais quanto em situação de incêndio, sugere-se que futuras pesquisas explorem abordagens mais integradas. A continuidade desse estudo pode incluir análises comparativas entre vigas de madeira, concreto e aço, considerando a relação entre economia de material e confiabilidade estrutural. Além disso, é recomendável expandir a investigação para incluir outros elementos estruturais, como pilares e lajes, e integrar técnicas avançadas de otimização e confiabilidade com modelagem por elementos finitos, em substituição às equações de estado limite simplificadas.

REFERÊNCIAS

BAKER, K. R. **Optimization Modeling with Spreadsheets**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

BECK, A. T., **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier 2019. ISBN 978-85-352-8688-5.

BECK, A. T. **Curso de confiabilidade estrutural**. São Carlos: EESC-USP, 2014.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

CHEUNG, A. B.; PINTO, E. M.; CALIL JUNIOR, C. **Confiabilidade estrutural de vigas de madeiras submetidas à flexão em condições normais e em situação de incêndio**. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM, 2012, Vitória. Anais do Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

GARCIA-CASTILLO, E.; GERNAY, T.; PAYA-ZAFORTEZA, I.. **Probabilistic Models for Temperature-Dependent Compressive and Tensile Strengths of Timber**. *Journal of Structural Engineering*, v. 149, n. 2, p. 04022239, 2023. ISSN 0733-9445. doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003334.

HURLEY, M. J.; ROSENBAUM, E. R. **Performance-Based Fire Safety Design**. Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015.

JELUŠIČ, P.; KRAVANJA, S. **Optimal design of timber-concrete composite floors based on the multi-parametric MINLP optimization**, *Composite Structures*, v. 179, p. 285–293, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.07.062.

LIU, H.; ZHANG, D.; XIAO, H.; WANG, Y. **Probabilistic methods for structural reliability analysis and design: A state-of-the-art review**. *Engineering Structures*, 2021.

MAHSULI, M.; HAUKAAS, T. **Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 27, n. 1, p. 87–98, 2013.

MESSAC, A. **Optimization in Practice with MATLAB: For Engineering Students and Professionals**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

MORAES, M. H. M. de; FRAGA, I. F.; FRANCKLIN, H. M.; Molina, J. C.; Lahr, F. A. R.; Christoforo, A. L.. **Otimização de estruturas de madeira: revisão sistemática da literatura e análise de Metodologias**. *Revista Caderno Pedagógico*, Curitiba, v. 21, n. 6, p. 01-23, 2024. ISSN 1983-0882. DOI:10.54033/cadpedv21n6-184.

PECH, S.; KANDLER, G.; LUKACEVIC, M.; FÜSSL, J. **Metamodel assisted optimization of glued laminated timber beams by using metaheuristic algorithms**, Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 79, p. 129–141, 2019. DOI: 10.1016/j.engappai.2018.12.010.

RICARDO, A. S. 2022. **Confiabilidade de Elementos e Sistemas Estruturais Metálicos em Situação de Incêndio Utilizando Redes Neurais Artificiais Adaptativas**. Accessed July 29, 2024. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/234993>.

RICARDO, A., S., and GOMES W., J., S.. 2021. **Structural Reliability Methods Applied in Analysis of Steel Elements Subjected to Fire** J. Eng. Mech., 2021, 147(12): 04021108. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023).

ROSTAMI, P.; MAHSULI, M. **Risk-Optimal Arrangement of Stiffeners in Steel Plate Shear Walls With Door Opening**. Frontiers in Built Environment, v. 4, p. 59, 2018.