

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

PEDRO VERONA PERINI

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE
MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

São Leopoldo

2022

PEDRO VERONA PERINI

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE
MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Longhi Bolina

São Leopoldo

2022

A meus pais, por colocarem os meus estudos acima de seus confortos.

AGRADECIMENTOS

Direta ou indiretamente, muitas pessoas contribuíram com a execução desse trabalho. Dentre as quais destaco e agradeço:

A meus pais, Euclides e Margarete, heróis que pavimentaram meu caminho até aqui e que compreenderam minhas necessidades excepcionais nesse período.

À minha namorada, Jeniffer, pela motivação e conforto nas horas em que o desespero pareceu maior que as minhas capacidades.

A meus amigos e familiares, por entenderem meu afastamento e fazer dos importantes momentos de pausa um período de recarga de energia, sendo todos fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Especialmente ao professor orientador Dr. Fabricio Longhi Bolina, pela imensa paciência e pelas contribuições durante a evolução desse documento, além dos ensinamentos compartilhados nas diferentes atividades acadêmicas das quais participei dentro da Unisinos.

RESUMO

O avanço da industrialização, o aumento do preço do aço em um contexto de pandemia e guerra e incentivos governamentais têm feito aumentar o interesse pelo uso da madeira como material estrutural para edificações, inclusive de múltiplos pavimentos. A necessidade de esses edifícios resistirem a determinados períodos de incêndio para que seus usuários possam ser evacuados nessa situação, juntamente à ausência de normativa vigente no Brasil, faz com que seja necessário o aprofundamento dos estudos sobre esse assunto. Diversos autores relataram a influência que a densidade da madeira tem em manter sua resistência em situação de incêndio, mas a norma europeia *Eurocode 5* não traz essa propriedade como uma variável na obtenção da taxa de carbonização da madeira. Buscando identificar a relação entre a densidade, a taxa de carbonização e a resistência de vigas de madeira à flexão, esse estudo comparou os diferentes métodos propostos pelo *Eurocode 5* na verificação de vigas de madeira de 30 x 60 cm de quatro espécies, sendo duas coníferas e duas dicotiledôneas, utilizando o *software* Abaqus/CAE para obtenção das isotermas das seções das vigas no método de cálculo avançado, e propôs uma nova equação para obter a profundidade de carbonização delas em diferentes tempos de incêndio. Verificou-se que a densidade da madeira é inversa à sua taxa de carbonização e à sua perda de resistência à flexão, e que o método de cálculo avançado apresenta resultados menos conservadores do que os métodos simplificados, porém toma mais tempo de cálculo e esforço computacional. A equação proposta nesse estudo obteve resultados ligeiramente mais conservadores do que o método de cálculo avançado (a maior diferença foi de 8,63%) e menos conservadores do que os métodos simplificados (diferença de até 276,9%), se mostrando satisfatório nos quesitos de tempo, esforço computacional e economia.

Palavras-chave: madeira; incêndio; densidade; taxa de carbonização; resistência; Abaqus/CAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Torre Mjosa, na Noruega, construída em estrutura de madeira	15
Figura 2: Elementos estruturais de aço e de madeira em edifício incendiado	19
Figura 3: Zonas de temperatura em seção de madeira exposta ao fogo	20
Figura 4: Seção carbonizada da madeira.....	21
Figura 5: Coeficiente de modificação da massa específica da madeira, com 12% de teor de umidade, em função da temperatura.....	23
Figura 6: Relação temperatura-calor específico para madeira e carvão	25
Figura 7: Relação temperatura-condutividade térmica para madeira e camada carbonizada.....	28
Figura 8: Evolução da profundidade de carbonização para diferentes densidades a partir do modelo da condutividade	32
Figura 9: Variação do módulo de elasticidade de <i>Pinus sylvestris</i> com a temperatura, em razão do seu módulo de elasticidade a 25°C	35
Figura 10: Efeito da temperatura no módulo de elasticidade paralelo às fibras para madeira de árvores coníferas.....	36
Figura 11: Resistência à compressão paralela às fibras da madeira de paricá	37
Figura 12: Resistência relativa à compressão paralela às fibras em função da temperatura	38
Figura 13: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras	39
Figura 14: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras	40
Figura 15: Resistência relativa à compressão paralela às fibras em razão da temperatura	40
Figura 16: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras para madeira de árvores coníferas.....	41
Figura 17: Resistência à tração paralela às fibras da madeira de paricá	42
Figura 18: Efeito da temperatura na resistência à tração paralela às fibras.....	42
Figura 19: Efeito da temperatura na resistência à tração paralela às fibras para madeira de árvores coníferas.....	43
Figura 20: Evolução da temperatura do ambiente devida ao incêndio.....	43
Figura 21: Comparação de curvas temperatura-tempo – ASTM E119 x ISO 834.....	44
Figura 22: Formação de carvão em diferentes tempos de exposição ao fogo	49
Figura 23: Verificação da temperatura em pontos da seção aquecida.....	50

Figura 24: Comparação entre a seção residual prevista numericamente e a seção residual observada experimentalmente no tempo de 60 minutos	51
Figura 25: Formação de camada carbonizada em diferentes tempos de exposição ao fogo para amostras de CLT	52
Figura 26: Exposição da viga ao incêndio	55
Figura 27: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio	61
Figura 28: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio	62
Figura 29: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio	65
Figura 30: Seção de <i>Pinus elliotti</i> no tempo de incêndio de 90 min	66
Figura 31: Seção de <i>Pinus taeda L.</i> no tempo de incêndio de 90 min	66
Figura 32: Seção de <i>Eucalyptus saligna</i> no tempo de incêndio de 90 min	67
Figura 33: Seção de <i>Tabebuia serratifolia</i> no tempo de incêndio de 90 min	67
Figura 34: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio	69
Figura 35: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio	70
Figura 36: Taxa de carbonização média – <i>Pinus elliotti</i> (V#1-PE-560)	71
Figura 37: Taxa de carbonização média – <i>Pinus taeda L.</i> (V#2-PT-645)	71
Figura 38: Taxa de carbonização média – <i>Eucalyptus saligna</i> (V#3-ES-731)	72
Figura 39: Taxa de carbonização média – <i>Tabebuia serratifolia</i> (V#4-TS-1068)	72
Figura 40: Resistência relativa à flexão – <i>Pinus elliotti</i> (V#1-PE-560)	73
Figura 41: Resistência relativa à flexão – <i>Pinus taeda L.</i> (V#2-PT-645)	74
Figura 42: Resistência relativa à flexão – <i>Eucalyptus saligna</i> (V#3-ES-731)	74
Figura 43: Resistência relativa à flexão – <i>Tabebuia serratifolia</i> (V#4-TS-1068)	75
Figura 44: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio – comparação entre norma estadunidense NDS (AWC, 2017) e MCA do Eurocode 5	77
Figura 45: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio – comparação entre norma australiana AS1720.4 (AS, 2018) e MCA do Eurocode 5	78
Figura 46: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio	80
Figura 47: Resistência à flexão relativa – <i>Pinus elliotti</i> (V#1-PE-560)	82
Figura 48: Resistência à flexão relativa – <i>Pinus taeda L.</i> (V#2-PT-645)	83
Figura 49: Resistência à flexão relativa – <i>Eucalyptus saligna</i> (V#3-ES-731)	83
Figura 50: Resistência à flexão relativa – <i>Tabebuia serratifolia</i> (V#4-TS-1068)	84
Figura 51: Seção residual genérica com efeito de arredondamento dos cantos	97
Figura 52: Isotermas de viga de <i>Pinus elliotti</i> no tempo de incêndio de 90 min	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de energia consumida e resistência de materiais convencionalmente utilizados na construção civil no Brasil	18
Tabela 2: Valores médios experimentais e corrigidos para o teor de umidade de 12% das propriedades mecânicas da madeira de eucalipto e respectivos sublotes	22
Tabela 3: Calor específico e razão entre densidade e densidade seca de madeiras coníferas para classe de serviço 1	26
Tabela 4: Relação temperatura-condutividade térmica para madeira e camada carbonizada.....	28
Tabela 5: Taxas de carbonização β_0 e β_n	29
Tabela 6: Resultados experimentais	31
Tabela 7: Densidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização	33
Tabela 8: f_{co} da madeira de carvalho a temperaturas de 23°C a 220°C	37
Tabela 9: Valores médios de madeiras nativas e de florestamento	54
Tabela 10: Calor específico da madeira em relação à temperatura	56
Tabela 11: Condutividade térmica da madeira em relação à temperatura	57
Tabela 12: Densidade de cada espécie de madeira em relação à temperatura.....	57
Tabela 13: Resistência à flexão no instante inicial de incêndio.....	59
Tabela 14: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da seção reduzida	60
Tabela 15: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da seção reduzida	60
Tabela 16: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com o método da seção reduzida	62
Tabela 17: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da redução de propriedades (sem considerar arredondamento dos cantos)	63
Tabela 18: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da redução de propriedades (considerando arredondamento dos cantos)	63
Tabela 19: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da redução de propriedades (sem considerar arredondamento dos cantos)	64

Tabela 20: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da redução de propriedades (considerando arredondamento dos cantos).....	64
Tabela 21: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da seção reduzida.....	68
Tabela 22: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método de cálculo avançado	68
Tabela 23: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com o método de cálculo avançado	69
Tabela 24: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor.....	80
Tabela 25: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , relativa ao instante inicial de incêndio, de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor.....	81
Tabela 26: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor.....	81

ACRÔNIMOS

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	Australian Standards
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWC	American Wood Council
CLT	Cross-Laminated Timber (Madeira laminada cruzada)
EN	European Standard
ISO	International Organization for Standardization
LVL	Laminated Veneer Lumber (Madeira microlaminada)
MCA	Método de Cálculo Avançado
MLC	Madeira Laminada Colada
MRP	Método da Redução de Propriedades
MSR	Método da Seção Reduzida
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NDS	National Design Specification
ONU	Organização das Nações Unidas
PRF	Polímero Reforçado

Letras maiúsculas

A	Área
A_r	Área da seção residual
M_{rc}	Momento fletor resistente na parte comprimida
$M_{rc,fi}$	Momento fletor resistente na parte comprimida em situação de incêndio
M_{rt}	Momento fletor resistente na parte tracionada
$M_{rt,fi}$	Momento fletor resistente na parte tracionada em situação de incêndio
U	Teor de umidade
W_c	Módulo de resistência à compressão
W_t	Módulo de resistência à tração

Letras minúsculas

b	Largura da viga
---	-----------------

d_{char}	Profundidade de carbonização
d_{ef}	Profundidade de carbonização efetiva
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras da madeira
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras da madeira
f_v	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira
h	Altura da viga
k_{mod}	Coefficiente de modificação da madeira
$k_{mod,fi}$	Coefficiente de modificação da madeira ao incêndio
p	Perímetro
t	Tempo

Letras gregas

β	Taxa de carbonização
β_0	Taxa de carbonização usual
β_n	Taxa de carbonização nominal
$\beta_{méd}$	Taxa de carbonização média
ρ	Densidade
ρ_{ap}	Densidade aparente
ω	Teor de umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 DEGRADAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA COM A TEMPERATURA.....	20
2.2 PARÂMETROS FÍSICOS DA MADEIRA.....	22
2.2.1 Densidade	22
2.2.1.1 Efeito do aumento de temperatura	23
2.2.2 Teor de umidade	23
2.2.2.1 Efeito do aumento de temperatura	24
2.2.3 Calor específico	24
2.2.3.1 Efeito do aumento de temperatura	25
2.2.4 Condutividade térmica	26
2.2.4.1 Efeito do aumento de temperatura	27
2.3 TAXA DE CARBONIZAÇÃO	28
2.3.1 Segundo normas internacionais	29
2.3.2 Segundo resultados experimentais	30
2.3.3 Segundo resultados numéricos	32
2.4 PARÂMETROS FÍSICOS DO CARVÃO.....	32
2.4.1 Densidade	33
2.4.2 Calor específico	33
2.4.3 Condutividade térmica	34
2.5 DEGRADAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA COM A TEMPERATURA	34
2.5.1 Módulo de elasticidade	35
2.5.2 Compressão paralela às fibras	36
2.5.3 Tração paralela às fibras	41
2.6 PROCEDIMENTOS PARA PADRONIZAÇÃO DE TESTES DE INCÊNDIO	43
2.7 MÉTODOS DO <i>EUROCODE 5</i> PARA VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	45
2.7.1 Método da seção reduzida	45

2.7.2 Método da redução de propriedades.....	45
2.7.3 Métodos de cálculos avançados.....	46
2.8 MODELAGEM NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS	46
2.8.1 Considerações e resultados de diferentes autores.....	47
3 METODOLOGIA	54
3.1 MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR).....	55
3.2 MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP)	55
3.3 MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)	56
3.4 PROPOSTA DE EQUAÇÃO PARA CÁLCULO SIMPLIFICADO.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 ANÁLISE NO INSTANTE INICIAL DE INCÊNDIO	59
4.2 VERIFICAÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS	60
4.2.1 Método da seção reduzida.....	60
4.2.2 Método da redução de propriedades.....	63
4.2.3 Método de cálculo avançado.....	65
4.2.4 Comparativo entre métodos.....	70
4.3 DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÃO PARA TAXA DE CARBONIZAÇÃO	76
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS.....	87
APÊNDICE A – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS À FLEXÃO NO INSTANTE INICIAL DE INCÊNDIO	93
A.1 – MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR)	93
A.2 – MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP).....	94
A.3 – MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)	94
APÊNDICE B – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS À FLEXÃO NO TEMPO DE INCÊNDIO DE 90 MIN	95
B.1 – MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR)	95
B.2 – MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP).....	96
B.2.1 – MRP sem considerar efeito de arredondamento nos cantos.....	96
B.2.2 – MRP considerando efeito de arredondamento nos cantos.....	96
B.3 – MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)	97
APÊNDICE C – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS COM O MÉTODO ELABORADO PELO AUTOR.....	99

1 INTRODUÇÃO

A característica renovável e de estoque de carbono da madeira – reduzindo a emissão de gases do efeito estufa – transforma esse material em um facilitador para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que tratam, dentre outros, de inovação, cidades sustentáveis, produção responsável e ação contra a mudança global do clima, e os objetivos do Acordo de Paris, que encoraja os governos a tomarem medidas de incentivo à redução de emissões de gases a partir da degradação florestal (ONU, [2022?]; ONU, 2015). Juntamente ao avanço de tecnologias industrializadas, essa característica acelera a tendência de aumento do uso da madeira na construção civil (SHIGUE, 2018).

Frühwald (2003) também vê interesses econômicos atrelados à flexibilidade ambiental do uso da madeira, afirmando que esse interesse se dá pela possibilidade de reutilização dela em três ciclos: produto de primeira mão, produto reciclado e geração de energia através da queima; mas Shigue (2018) observa que nenhuma característica sozinha é capaz de justificar o interesse tão crescente no uso da madeira se não estiver conectada à redução no custo de venda no final da cadeia produtiva.

Por outro lado, a solidez do histórico de utilização do concreto armado como material de construção civil no país é um fator que colabora com a baixa utilização da madeira, mesmo os recursos florestais sendo abundantes a nível nacional (SHIGUE, 2018). Para Calil Junior et al (2003), Figueroa e Moraes (2009) e Rocha (2014), o uso da madeira com propósito estrutural em edifícios vinha sendo comumente descartado pelo preconceito dos profissionais da construção em relação ao seu comportamento frente a altas temperaturas decorrentes de incêndio.

A capacidade de um edifício de manter sua estrutura íntegra por um determinado período, que seja suficiente para evacuar e proteger seus usuários, é um dos fatores mais importantes para sua segurança em uma situação de incêndio (MORAES et al, 2004). Indo no caminho contrário ao identificado pelos autores brasileiros, Quiquero et al (2019) afirmam que a recorrência desse material em estruturas de edificações é cada vez maior, por isso compreender o comportamento da madeira em presença de fogo é tão importante.

Diversos autores identificaram a influência da densidade na taxa de carbonização da madeira, característica que acaba afetando também a resistência

de um elemento estrutural em situação de incêndio; porém normas referências no comportamento de elementos estruturais de madeira em exposição ao fogo, como a norma europeia, a australiana e a estadunidense, abordam a taxa de carbonização fazendo uma simplificação branda, na qual desconsideram o tempo de duração do incêndio e/ou a influência da densidade da madeira, salientando a necessidade de se compreender mais profundamente o real comportamento dessa característica das madeiras frente a essas variáveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), o Brasil contava com 9 milhões de hectares de árvores plantadas em 2019 – um aumento de 2,4% em relação ao ano anterior – sendo 830 mil hectares no Rio Grande do Sul. Para a Associação Gaúcha de Empresas Florestais (AGEFLOR, 2020), era 1,03 milhão de hectares a área de árvores plantadas em 2019 no estado. O aumento das florestas plantadas, combinado à evolução das tecnologias em madeira destinadas à construção civil, otimizando custo, qualidade e durabilidade, gera interesse do setor florestal e da construção civil (SHIGUE, 2018).

Além desses fatores, o contexto de guerra entre Rússia e Ucrânia, duas grandes fornecedoras de aço para o mundo inteiro, fez o preço do material subir, por conta das sanções impostas à primeira e dos ataques sofridos pela segunda (VALVERDE, 2022). O aumento real do preço de produção do aço entre o início de janeiro e meados de março de 2022 foi de 37,5% no Brasil, devido às altas do minério de ferro e, principalmente, do carvão, sendo amenizado pela redução do dólar americano em comparação ao real (DIRETOR, 2022). Esse aumento no preço do material já vinha de antes da guerra, quando, em função da pandemia, o preço dos vergalhões de aço chegara a ter aumento de mais de 90% em um período de 18 meses, segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (AUMENTO, 2021; CONSTRUÇÃO, 2022).

A madeira, apesar de também ter sido impactada pela pandemia da Covid-19, apresentou inflação significativamente menor no ano de 2021: 40,76% (SARAIVA, 2022). Em janeiro de 2022, a inflação desse material foi de 3,14% (PREÇOS, 2022). Essa diferença de aumento entre a madeira e o aço faz as estruturas de madeira se

confirmarem ainda mais como alternativa às construções metálicas e de concreto armado.

Além do preço direto da madeira, construções de larga escala que adotam esse elemento como material estrutural têm outros benefícios mencionados por Quiquero et al (2019): diminuição do peso global da estrutura, dos gastos com mão-de-obra, do tempo de construção e da pegada de carbono. Esse último é destacado por Calil Junior et al (2003), que defenderam a baixa emissão de poluentes na extração da madeira, em comparação a níveis elevados na produção de concreto e de aço.

Por outro lado, um fator que desestimula o uso da madeira como material de estrutura de edificações é a falta de normativa vigente para verificação desse material ao incêndio, exigência para prédios de uso público, multifamiliares ou similares (SHIGUE, 2018). Essa ausência mostra o descompasso do Brasil em relação a outros países do mundo (PERTILE, 2018).

Apesar disso, segundo Caetano (2021), existem projetos de edifícios de múltiplos pavimentos com uso de estrutura de madeira no Brasil, evidenciando uma tendência que ocorre em outras partes do globo, como na Noruega, onde está localizado o mais alto edifício de madeira do mundo (projetado para resistir a 90 min de incêndio), apresentado na Figura 1; nos EUA, onde está em construção um prédio ainda mais alto, previsto para ser concluído no segundo semestre de 2022 (e cujos materiais foram testados para durar mais de 180 min frente ao fogo); e no Chile, onde está o prédio de madeira mais alto da América Latina (O EDIFÍCIO, 2021; JANNENE, 2021).

Figura 1: Torre Mjosa, na Noruega, construída em estrutura de madeira



Fonte: Adaptada de O Edifício (2021)

A aparição desses prédios tende a aumentar ainda mais o interesse em entender o comportamento da madeira frente ao incêndio, e a simulação numérica com uso do método de elementos finitos se apresenta como uma alternativa eficiente e mais barata em relação a testes experimentais, enquanto também proporciona resultados mais realistas em comparação a métodos simplificados de algumas normas, como o *Eurocode 5* (THI et al, 2016; THI et al, 2017).

Faz-se necessário o aprofundamento em pesquisas no país e a elaboração de normativa, na área do comportamento de estruturas de madeira em situação de incêndio, para que os profissionais possam estar amparados por normas técnicas que apresentem dados seguros e precisos em relação aos tipos de madeira produzidas no Brasil. Tal elaboração pode evitar que o país se demonstre atrasado em relação às tendências existentes no seu próprio território, e a análise através do método de elementos finitos se mostra um facilitador nesse caminho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da densidade de vigas de madeira serrada, de seção 30 x 60 cm, na sua resistência ao incêndio, tomando como base quatro espécies diferentes, sendo duas da classe das coníferas (*Pinus elliotti* e *Pinus taeda* L.) e duas da classe das dicotiledôneas (*Eucalyptus saligna* e *Tabebuia serratifolia*).

1.2.2 Objetivos específicos

a) Verificar a resistência à flexão de vigas de madeira serrada no instante inicial de exposição ao incêndio, de acordo com os métodos propostos pelo *Eurocode 5* (norma EN 1995-1-2:2004).

b) Verificar a profundidade de carbonização e a resistência à flexão de vigas de madeira serrada em diferentes tempos de incêndio através dos diferentes métodos simplificados propostos pelo *Eurocode 5*.

c) Verificar a profundidade de carbonização e a resistência à flexão de vigas de madeira serrada por meio do método de cálculo avançado, atribuindo características orientadas pelo *Eurocode 5*, para madeiras com diferentes densidades.

d) Verificar o grau de conservadorismo que os métodos simplificados do *Eurocode 5* adotam em relação ao método de cálculo avançado.

e) Propor equação que apresente uma forma simplificada de obter resultados próximos aos do método de cálculo avançado do *Eurocode 5*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Brasil tem a maior área de floresta plantada do mundo, segundo Rocha (2014). A extração e o desdobro da madeira consomem baixa energia durante o processo quando a plantação é devidamente controlada e seu replantio é feito adequadamente (CALIL JUNIOR et al, 2003). Além disso, a madeira é uma matéria-prima renovável, produzida inclusive sob diversas condições climáticas desfavoráveis (CALIL JUNIOR et al, 2003).

Em comparação aos outros dois materiais base para a construção civil no Brasil – concreto armado e aço –, a madeira se mostra ainda mais eficiente em termos de emissão de poluentes e consumo de energia (CALIL JUNIOR et al, 2003). Não só no processo, mas também na parte de extração, ambos materiais agredem mais o meio ambiente, quando comparados com a madeira, conforme exposto na Tabela 1. Destaca-se também que o aço e o concreto são materiais cuja reposição na natureza é impraticável (CALIL JUNIOR et al, 2003).

Tabela 1: Características de energia consumida e resistência de materiais convencionalmente utilizados na construção civil no Brasil

Material	Energia consumida na produção (MJ/m ³)	Resistência (MPa)	Relação Energia/Resistência
Concreto	1.920	20	96
Aço	234.000	250	936
Madeira conífera	600	50	12
Madeira dicotiledônea	630	75	8,4

Fonte: Adaptada de Calil Junior et al (2003)

A madeira, apesar de bom comportamento quando submetida ao fogo, sofre preconceito devido a um senso comum de que ela é um material pouco resistente ao incêndio (ROCHA, 2014). Shigue (2018) verifica a existência de leis que proíbem o uso de madeira na composição estrutural de edifícios de múltiplos pavimentos em vários países do mundo, justificando-se pela combustibilidade do material. Toppinen (2018) afirma que os próprios profissionais da construção são céticos ao uso de madeira em edifícios de múltiplos pavimentos por conta de algumas incertezas como resistência ao fogo, estabilidade e durabilidade.

Rocha (2014) afirma que, se nada for feito para conter o fogo ativo em um elemento de madeira, o material carboniza gradualmente até se esvair por completo, levando ao colapso o elemento e, dependendo da configuração, o restante da estrutura; todavia, Calil Junior et al (2003) defende que “as peças estruturais de madeira evidenciam um conveniente desempenho a altas temperaturas”, visto que a carbonização ocorrente no perímetro do elemento, apesar de deixar de colaborar estruturalmente, protege seu interior, já que o carvão possui baixo coeficiente de condução térmica. A Figura 2 representa um edifício composto por elementos de madeira e elementos metálicos que sofreu a ação do fogo e mostra como a carbonização do perímetro do elemento de madeira pode ser conveniente em determinadas situações.

Figura 2: Elementos estruturais de aço e de madeira em edifício incendiado



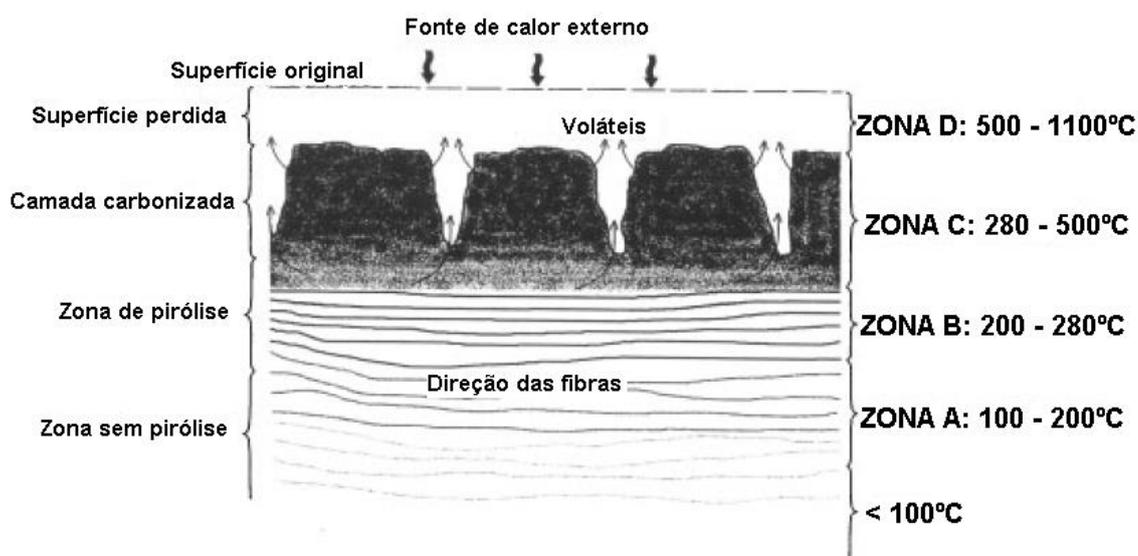
Fonte: Calil Junior et al (2003)

De acordo com Pinto e Calil Junior (2006), há dois principais motivos que ocasionam a perda de resistência de um elemento de madeira em situação de incêndio: a) a diminuição gradual da seção, que é substituída por uma camada de carvão e conseqüente esvaimento de material; e b) redução das propriedades mecânicas quando expostas a temperaturas elevadas.

2.1 DEGRADAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA COM A TEMPERATURA

A madeira não queima diretamente, mas é influenciada pelo processo de pirólise (FRIQUIN, 2011). Segundo Moreira (2015), “a pirólise implica na ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-hidrogênio”, sendo, portanto, um processo de oxidação-redução, dando origem a fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. No caso da madeira, as temperaturas extremas causadas pelo fogo a decompõem em forma de voláteis, de alcatrão e de carvão altamente reativo (FRIQUIN, 2011). A Figura 3 representa as quatro zonas de aquecimento que estão presentes na madeira.

Figura 3: Zonas de temperatura em seção de madeira exposta ao fogo



Fonte: Friquin (2011, tradução nossa)

Com temperaturas a partir de 100°C, a água livre começa a evaporar. Lignina, celulose e hemicelulose (polímeros que constituem a madeira) começam a se decompor nas temperaturas entre 160°C e 180°C, e acontece uma lenta pirólise na madeira, com baixa redução na sua densidade. Os gases liberados nessa fase não são combustíveis (o principal é vapor d'água) e a desidratação da madeira é completa (FRIQUIN, 2011).

Em temperaturas entre 150°C e 200°C, gases combustíveis, como terpenos e ceras, são liberados (FIGUEROA, 2012). Chamas pilotos podem ser desencadeadas entre 225°C e 275°C, sendo os gases então queimados por chama visível (FRIQUIN, 2011).

Quando a temperatura na madeira atinge a faixa dos 300°C, a estrutura da madeira começa a se romper e fendas perpendiculares às fibras da madeira começam a aparecer na superfície; também se forma a camada de carvão, causando perda na densidade da madeira (FRIQUIN, 2011). Por conterem não-inflamáveis como dióxido de carbono e vapor d'água, os gases liberados nessa etapa não ignificam, porém a inflamabilidade aumenta devido a uma pirólise mais rápida, tendo como produto gases amplamente combustíveis, como monóxido de carbono e metano (FRIQUIN, 2011).

Com a temperatura atingindo a faixa dos 350°C, a ignição se forma com qualquer faísca presente (FRIQUIN, 2011). O acréscimo da temperatura na parte interna da madeira passa a ocorrer com um decréscimo de velocidade, já que o carvão tem menor capacidade de condução térmica do que a madeira em estado natural, formando assim uma camada isolante para ela (FRIQUIN, 2011). A partir desse ponto, a taxa de carbonização deixa de ser máxima, e decresce até chegar a um valor constante, no qual a camada carbonizada passa a ser praticamente mantida (MIKKOLA, 1991).

O carvão continua a fumegar e oxidar a temperaturas acima de 450°C, formando monóxido e dióxido de carbono, vapor d'água e perdendo massa. Com a temperatura atingindo 1.100°C, esse processo ocorre na mesma velocidade com que a pirólise atua na madeira (FRIQUIN, 2011). A Figura 4 representa as diferentes camadas de uma seção de madeira com borda carbonizada.

Figura 4: Seção carbonizada da madeira



Fonte: Figueroa (2012)

2.2 PARÂMETROS FÍSICOS DA MADEIRA

Com o aumento da temperatura, a madeira sofre alterações físicas, como perda de umidade (FIGUEROA, 2012). Outros parâmetros físicos importantes da madeira – principalmente para avaliação do seu comportamento em situação de incêndio – são abordados nesse subcapítulo.

2.2.1 Densidade

Segundo Shimoyama (1990), o conhecimento da densidade da madeira se demonstra importante pois afeta diretamente sua resistência a diversos esforços e à maioria de suas propriedades. Lobão et al (2004) apresentam os resultados da Tabela 2, feitos em amostras de eucaliptos de diferentes densidades, e afirmam que eles evidenciam a “forte relação entre a densidade da madeira e as suas propriedades mecânicas”.

Tabela 2: Valores médios experimentais e corrigidos para o teor de umidade de 12% das propriedades mecânicas da madeira de eucalipto e respectivos sublotes

Sublote	ρ_{ap} (12%) (kg/m ³)	f_{c0} MPa	f_{t0} MPa	f_v MPa
A (baixa densidade)	575	49,5	75,3	8,7
B (alta densidade)	880	62,4	93,6	12,2

Fonte: Adaptada de Lobão et al (2004)

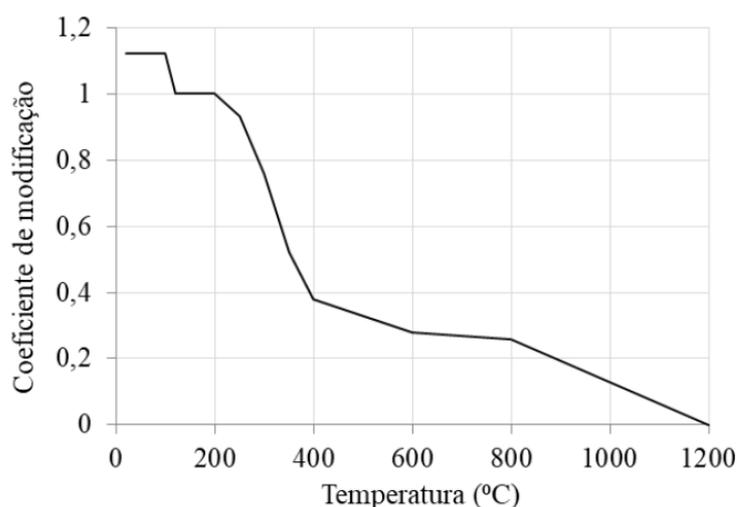
Nos testes de compressão paralela às fibras, o resultado do sublote de baixa densidade apresentou uma resistência média 20,67% menor do que o lote de alta densidade; para a tração paralela às fibras, o resultado foi 19,55% menor; para o cisalhamento, 28,69% menor. A densidade do sublote A era 34,66% menor do que a densidade do sublote B.

Segundo Vidaurre et al (2011), ainda existe diferença entre as densidades do lenho juvenil e do lenho adulto, sendo as resistências mecânicas do primeiro, menores. Eles afirmam que a necessidade desse entendimento se dá pelo aumento de interesse em árvores de ciclo curto, o que, segundo Lara Palma e Ballarin (2003, apud VIDAURRE et al, 2011), é fruto da pressão crescente na demanda de madeira.

2.2.1.1 Efeito do aumento de temperatura

A norma europeia EN 1995-1-2:2004 apresenta uma curva (Figura 5) que representa o efeito do aumento de temperatura sobre a densidade da madeira. De 20°C a 99°C, cresce-se o teor de umidade da amostra ($U=12\%$) ao peso do lenho; a partir dos 100°C, considera-se que a água começa a evaporar, chegando a um valor constante unitário a partir dos 120°C – que dura até os 200°C; quando a temperatura passa dos 200°C, o coeficiente de modificação, conforme observa-se na curva, tem alterações mais severas, chegando à nulidade na temperatura de 1.200°C.

Figura 5: Coeficiente de modificação da massa específica da madeira, com 12% de teor de umidade, em função da temperatura



Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

2.2.2 Teor de umidade

Sob condições de uso prático, produtos de madeira sempre apresentam teor de umidade não nulo (ADETAYO e DAHUNSI, 2019). O teor de umidade de uma amostra de madeira afeta características como peso, retração e resistência mecânica (SIMPSON e TENWOLDE, 1999). A resistência mecânica de uma amostra de madeira é diminuída com o aumento do teor de umidade, sendo mais sensível para valores mais baixos de umidade (LOGSDON, 1998).

O ponto de saturação das fibras, segundo Pertile (2018), está na faixa de 25% a 35% para a maioria das espécies e se refere a um ponto em que não existe água

livre no corpo da madeira, ao mesmo tempo em que não há espaços vazios, isso é, sem preenchimento de água.

Para a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), utiliza-se, para a caracterização das propriedades mecânicas da madeira, o teor de umidade igual a 12%, que é tido como o teor de umidade de equilíbrio da madeira quando o ambiente apresenta umidade de até 65%.

2.2.2.1 Efeito do aumento de temperatura

Como apresentado no item 2.1.1.1 e representado na Figura 5, a norma EN 1995-1-2 (2004) considera que o teor de umidade em uma amostra de madeira começa a decrescer quando a temperatura chega aos 100°C, e é finalmente anulado ao atingir 120°C

2.2.3 Calor específico

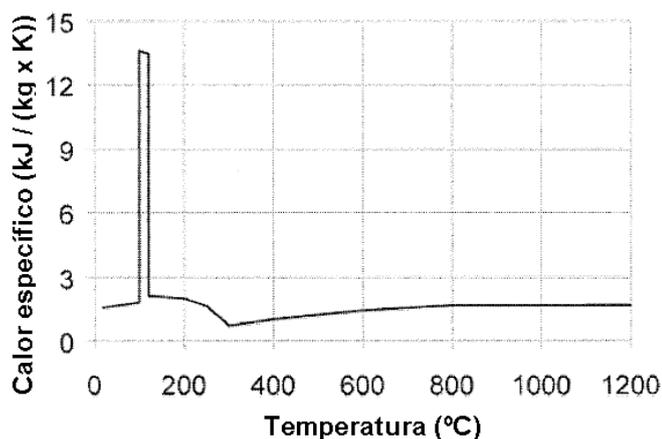
O calor específico da madeira depende da sua temperatura e do seu teor de umidade, mas não está atrelado à densidade ou à espécie do material (SIMPSON e TENWOLDE, 1999). De acordo com Radmanovic et al (2014), considera-se que o calor específico da madeira é a soma do calor específico da madeira seca ($U=0\%$), do calor específico da água impregnada e do calor específico da água livre (podendo as duas últimas variarem de acordo com o seu estado – líquido ou sólido) contidos em certo volume. Em relação ao teor de umidade, por conta de o calor específico da água – 1 kcal/(kg.°C) – ser maior que o da madeira seca – 0,327 kcal/(kg.°C) –, quanto maior o teor de umidade de uma amostra de madeira, maior será seu calor específico (MORESCHI, 2012).

Radmanovic et al (2014) afirmam que há grande discrepância entre resultados empíricos já publicados por diferentes autores em relação ao calor específico da madeira. Por exemplo, segundo pesquisa realizada por Deliiski (2011), entre as temperaturas 0°C e 100°C, o valor do calor específico para amostras com teor de umidade de 20% varia entre 2,1 kJ/(kg.°C) (a 0°C) e 2,45 kJ/(kg.°C) (a 100°C), aproximadamente. Já de acordo com o *Wood Handbook* de 2010 (GLASS e ZELINKA, 2010), para o mesmo teor de umidade, o calor específico varia entre 1,65 kJ / kg.°C (a 0°C) e 2,4 kJ / kg.°C (a 100°C).

2.2.3.1 Efeito do aumento de temperatura

A norma EN 1995-1-2 (2004) apresenta um gráfico que ilustra o calor específico em razão da temperatura, conforme Figura 6. Como o calor específico depende do teor de umidade e da temperatura da madeira, a partir dos 120°C, como não há mais a presença de água, ele passa a depender apenas da temperatura. O pico entre as temperaturas 99°C e 120°C tem a contribuição da energia necessária para evaporar a água, sendo um valor adotado pela norma que não corresponde ao calor específico real da madeira a essas temperaturas (CACHIM e FRANSSSEN, 2009).

Figura 6: Relação temperatura-calor específico para madeira e carvão



Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

Os valores do calor específico, ainda segundo a norma EN 1995-1-2 (2004), para algumas temperaturas específicas, são apresentados na Tabela 3, a qual apresenta não apenas esses valores, mas também a razão entre a densidade e a densidade seca da madeira.

Tabela 3: Calor específico e razão entre densidade e densidade seca de madeiras coníferas para classe de serviço 1

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ / kg.°C)	Razão entre densidade e densidade seca
20	1,53	1 + ω
99	1,77	1 + ω
99	13,60	1 + ω
120	13,50	1,00
120	2,12	1,00
200	2,00	1,00
250	1,62	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1,00	0,38
600	1,40	0,28
800	1,65	0,26
1200	1,65	0

ω é o teor de umidade

Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

2.2.4 Condutividade térmica

MacLean (1941) definiu as Equações 1 e 2 para determinar a condutividade térmica da madeira na direção paralela às fibras, após uma série de análises sobre 32 espécies de madeira.

$$S = [(100 \times W)/(100 + M)]/1000 \quad (1)$$

$$K = S \times (1,39 + 0,028M) + 0,165 \quad (2)$$

Sendo:

- K: condutividade térmica da madeira, em W/(m.K);
- S: densidade específica da madeira;
- W: densidade aparente da madeira, em kg/m³; e
- M: teor de umidade, em %.

Os estudos de MacLean (1941) mostraram que, para um aumento de 12°C a 53°C, a condutividade térmica das amostras aumentou em uma faixa de 0% a 4%. Por seu estudo buscar os valores em condições normais de uso da madeira e por

considerar o aumento insignificante, o autor ignorou em suas equações o efeito da temperatura.

Simpson e Tenwolde (1999) afirmaram que a condutividade térmica da madeira é dependente principalmente de características como sua densidade, seu teor de umidade e sua temperatura. Os autores ainda citam outras características que também tem impacto sobre a condutividade térmica da madeira: conteúdo extrativo da madeira, direção dos grãos e falhas como nós.

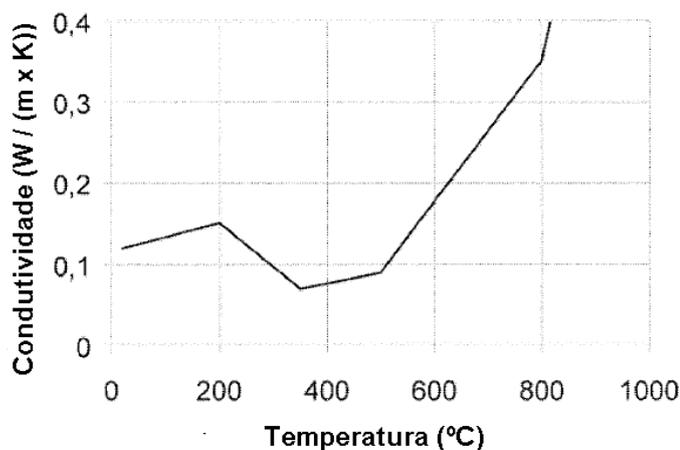
Leckner e Thunman (2002) classificam a condutividade térmica perpendicular às fibras como mais importante para avaliação de estruturas de madeira, visto que usualmente se dispõe as fibras no sentido longitudinal de um elemento estrutural. Segundo Simpson e Tenwolde (1999), a condutividade térmica tangencial e radial às fibras é praticamente idêntica, enquanto a condutividade paralela às fibras tem sido registrada com um fator de 1,5 a 2,8 em relação àquelas, com fator médio de 1,8.

2.2.4.1 Efeito do aumento de temperatura

Suleiman et al (1999) apresentaram resultados de condutividade térmica maior aos 100°C do que aos 20°C, contrariando a expectativa, segundo eles, de um resultado inverso em decorrência do ar que adentra os vazios da madeira. Com a variação da temperatura de 20°C a 100°C, a condutividade térmica apurada cresceu 14% na direção paralela às fibras e 24% na direção transversal (SULEIMAN et al, 1999).

Segundo a norma EN 1995-1-2 (2004), a relação entre temperatura e condutividade térmica se comporta da forma apresentada na Figura 7 e na Tabela 4. A norma ainda menciona que os valores de condutividade térmica da camada carbonizada são valores aparentes – não reais –, para compensar aumento de transferência de calor devido a rachaduras de contração acima dos 500°C e o consumo da camada de carvão a cerca de 1.000°C. Rachaduras no carvão ocasionam aumento de transferência de calor devido a convecção e a radiação (EN 1995-1-2:2004). Em desacordo aos autores citados no subcapítulo 2.2.4, a norma não considera influência da densidade da madeira na sua condutividade térmica a elevadas temperaturas.

Figura 7: Relação temperatura-condutividade térmica para madeira e camada carbonizada



Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

Tabela 4: Relação temperatura-condutividade térmica para madeira e camada carbonizada

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W / m.K)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

2.3 TAXA DE CARBONIZAÇÃO

A razão com que a madeira se transforma em carvão é um importante fator a ser considerado na análise de estabilidade de um elemento estrutural desse material quando exposto ao fogo (PINTO e CALIL JUNIOR, 2006). Para Cachim e Franssen (2009), a taxa de carbonização é dependente de diversos fatores, como espécie da madeira, densidade, permeabilidade, composição, teor de umidade e direção da

queima (paralela ou perpendicular às fibras). Normas internacionais e autores apresentam meios de obtenção, valores e resultados de taxa de carbonização (β).

2.3.1 Segundo normas internacionais

A norma europeia EN 1995-1-2 (2004) apresenta valores distintos de taxa de carbonização de acordo com categorias de madeira e tipos de elementos, conforme apresentado na Tabela 5. Os valores de β_0 representam uma taxa mais real, utilizada para elementos que sofrem ação do fogo em apenas uma face ou quando considera-se o arredondamento de cantos em elemento exposto ao fogo em duas ou mais faces. Os valores de β_n se referem a valores mais conservadores, para compensar uma eventual não consideração de arredondamento dos cantos.

Tabela 5: Taxas de carbonização β_0 e β_n

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Madeiras de árvores coníferas		
MLC com densidade característica maior ou igual a 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira sólida com densidade característica maior ou igual a 290 kg/m ³	0,65	0,80
b) Madeiras de árvores dicotiledôneas		
Madeira sólida ou MLC com densidade característica igual a 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira sólida ou MLC com densidade característica maior ou igual a 450 kg/m ³	0,50	0,55

Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

A norma EN 1995-1-2 (2004) estabelece que, para os cantos, o efeito de arredondamento só pode ser considerado quando a mínima dimensão do elemento atende aos parâmetros dados pelas Equações 3 e 4.

$$b_{\text{mín}} = 2 \times d_{\text{char},0} + 80, \text{ para } d_{\text{char},0} \geq 13 \text{ mm} \quad (3)$$

$$b_{\text{mín}} = 8,15 \times d_{\text{char},0}, \text{ para } d_{\text{char},0} < 13 \text{ mm} \quad (4)$$

Sendo:

- $b_{\text{mín}}$: dimensão mínima do elemento de madeira, em mm; e
- $d_{\text{char},0}$: profundidade de carbonização unidimensional, em mm.

A NDS (AWC, 2017) adota valores de profundidade de carbonização não-linear em função do tempo. Para os tipos mais convencionais de estruturas de madeira, o valor dado pela norma para a taxa de carbonização β é igual a 1,5

polegadas/hora (igual a aproximadamente 0,635 mm/min). A profundidade de carbonização d_{char} é dada pela norma NDS (AWC, 2017), conforme Equação 5.

$$d_{char} = \beta \times t^{0,813} \quad (5)$$

Sendo:

- d_{char} : profundidade de carbonização, em polegadas;
- β : taxa de carbonização, em polegadas/h; e
- t : tempo de exposição do elemento ao fogo, em h.

A norma australiana AS 1720.4 (AS, 2018) considera apenas a densidade da madeira como parâmetro para determinação de sua taxa de carbonização β (ADETAYO e DAHUNSI, 2018). A equação 6 representa o cálculo indicado por essa norma para a obtenção da taxa de carbonização, baseado na densidade aparente da madeira a 12% de umidade.

$$\beta = 0,4 + (280/\rho_{12})^2 \quad (6)$$

Sendo:

- β : taxa de carbonização, em mm/min; e
- ρ_{12} : densidade aparente a 12% de umidade, em kg/m^3 .

2.3.2 Segundo resultados experimentais

Frangi e Fontana (2003), em uma análise para quantificar a taxa de carbonização em vigas de madeira serrada e em vigas de madeira laminada colada (MLC), utilizando-se de teste com curva de aquecimento padronizada pela ISO 834 (1999), se depararam com valores médios entre 0,67mm/min e 0,7mm/min, levemente acima dos valores estabelecidos pelo *Eurocode 5*.

Fahrni et al (2017) também executaram testagens conforme a ISO 834 (1999) em amostras de MLC a fins de comparação com a norma europeia. Como resultado, eles obtiveram valores médios de β_o e de β_n iguais a 0,67mm/min e 0,73mm/min, respectivamente, com o primeiro variando de 0,63 mm/min a 0,72 mm/min e o segundo variando de 0,68 mm/min a 0,80 mm/min, sendo também ligeiramente acima dos valores estabelecidos pelo *Eurocode 5*.

Adetayo e Dahunsi (2018) realizaram experimentos utilizando amostras de seis espécies de árvores nigerianas, sendo elas retiradas do cerne das árvores. Segundo seus estudos, para elevação de temperatura de 30°C a 300°C em intervalo de 60 minutos em amostras com 12% de teor de umidade, as com maior densidade

dentre as analisadas (686 kg/m³) apresentaram a menor taxa de carbonização (0,48 mm/min), enquanto as de menor densidade (444 kg/m³) apresentaram a maior taxa de carbonização (0,74 mm/min). As menores taxas de carbonização, em geral, foram encontradas na faixa de 12% de teor de umidade, em comparação a 9% e a 15% (ADETAYO e DAHUNSI, 2018).

Njankouo et al (2004) avaliaram espécies de árvores tropicais por meio de teste padronizado pela ISO 834 (1999), a fim de comparar com as orientações do *Eurocode 5*. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados experimentais

Espécime	ρ (kg/m ³)	β (mm/min)	Relação Experimento/Eurocode 5
Bilinga1	692	0,58	1,16
Merbau1	779	0,50	1,00
Afzelia1	863	0,36	0,72
Afzelia2	836	0,43	0,86
Afzelia3	833	0,49	0,98
Afzelia4	800	0,51	1,02
Afzelia5	968	0,37	0,74
Wenge1	923	0,49	0,98
Balau1	939	0,40	0,80
Balau2	984	0,41	0,82
Azobe1	1050	0,41	0,82
Azobe2	1040	0,41	0,82
Azobe3	1000	0,41	0,82
Azobe4	1060	0,47	0,94

Fonte: Adaptada de Njankouo et al (2004)

Njankouo et al (2004) concluem que a densidade afeta significativamente o desempenho da madeira na resistência ao fogo e, apesar de alguns valores serem mais críticos do que o *Eurocode 5* recomenda, afirmam que valores menores podem ser adotados para madeiras de alta densidade.

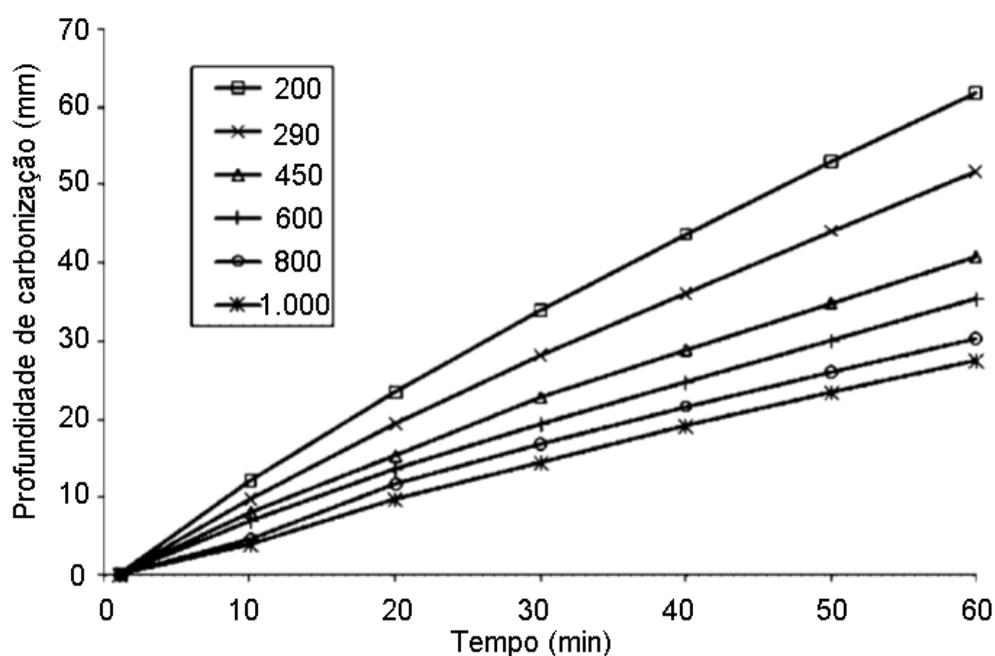
Wen et al (2015) encontraram relação inversa entre a densidade e a taxa de carbonização: enquanto, para as madeiras com densidade aparente de 350 kg/m³ a

12% de umidade, a taxa foi de 0,73 a 0,93 mm/min, para as de densidade aparente de 690 kg/m³, ela foi de 0,50 a 0,70 mm/min.

2.3.3 Segundo resultados numéricos

Cachim e Franssen (2009), investigando o comportamento de madeiras em situação de incêndio através de análise computacional guiada por um dos métodos apresentados no *Eurocode 5*, concluíram que, segundo o modelo da condutividade, a densidade da madeira exerce grande influência na taxa de carbonização da madeira. A Figura 8 representa os resultados da análise, ao identificar a profundidade de carbonização para madeiras de 200, 290, 450, 600, 800 e 1.000 kg/m³ a 12% de umidade.

Figura 8: Evolução da profundidade de carbonização para diferentes densidades a partir do modelo da condutividade



Fonte: Cachim e Franssen (2009, tradução nossa)

2.4 PARÂMETROS FÍSICOS DO CARVÃO

Segundo Rocha (2014), “[...] o carvão é um subproduto da combustão parcial da madeira, apresentando resistência mecânica desprezível”. A profundidade de carbonização é a espessura da borda da seção transversal de um elemento que se

transformou em carvão. Pinto (2005) avalia que o valor da taxa de carbonização é essencial para a determinação da resistência do elemento submetido ao fogo, dado que o principal ocasionador do colapso nessas estruturas é justamente a diminuição da área efetiva da seção.

2.4.1 Densidade

A densidade do carvão tende a refletir a densidade da madeira, sendo maior em madeiras de maior densidade (BOSCHETTI, 2017). Coutinho e Ferraz (1988), utilizando amostras de madeira da espécie *Eucalyptus saligna*, determinou que, para densidades de 400 kg/m³ a 550 kg/m³, a densidade do carvão obtido a 400°C é em torno de 250 kg/m³ a 400 kg/m³, sendo os maiores valores de densidade da madeira correspondentes aos maiores valores de densidade do carvão. Os resultados também mostram que a densidade do carvão diminui conforme aumenta a temperatura de carbonização, conforme apresentado na Tabela 7. Segundo os autores, essa diminuição ocorre de forma linear (COUTINHO e FERRAZ, 1988).

Tabela 7: Densidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

Temperatura (°C)	400	500	600	700	800	900	1.000
Densidade (kg/m ³)	0,31	0,27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18

Fonte: Adaptada de Coutinho e Ferraz (1988)

Santos et al (2011) analisaram que, a um aquecimento com duração de 7 horas e variação de temperatura de 150°C a 450°C, a relação entre a densidade de carvão e a densidade de madeira é de aproximadamente 0,40. Já Pereira et al (2012) constataram, em teste de 3,5 horas e variação de temperatura de 100°C a 450°C, que essa relação fica em torno de 0,69.

2.4.2 Calor específico

Santos (2013) apresenta resultados de calor específico para carvão de eucalipto variando entre 0,891 kJ/(kg.°C) e 1,096 kJ/(kg.°C). Ainda cita valores próximos encontrados por outros autores: 0,768 kJ/(kg.°C) a 1,506 kJ/(kg.°C)

(GUPTA et al, 2003 apud SANTOS, 2013); 0,709 kJ/(kg.°C) (ELTOM e SAYIGH, 1994 apud SANTOS, 2013).

2.4.3 Condutividade térmica

Segundo Pinto e Calil Junior (2006), a baixa condutividade térmica do carvão ocasiona um processo lento de degradação da madeira exposta ao fogo, fazendo com que a madeira interna à camada carbonizada seja protegida das altas temperaturas externas, mesmo sem a proteção de outros produtos ignífugos.

A condutividade térmica do carvão é aproximadamente 1/6 da encontrada na madeira (CALIL JUNIOR e PINTO, 2006). Em experimentos feitos em amostras de carvão de madeira de eucalipto sem identificar a espécie estudada, Santos (2013) apresenta condutividades térmicas variando de 0,026 W/(m.K) a 0,043 W/(m.K). O autor apresenta também dados de outros autores a diferentes temperaturas: 0,025 W/(m.K) a 0,09 W/(m.K) para uma faixa de temperatura entre 30°C e 90°C (ELTOM e SAYIGH, 1994 apud SANTOS, 2013); 0,05 W/(m.K) a 0,06 W/(m.K) entre 147°C e 247°C (SUUBERG et al, 2001 apud SANTOS, 2013); 0,0946 W/(m.K) à temperatura de 35°C para carvão proveniente de madeira de baixa densidade (GUPTA et al, 2002 apud SANTOS, 2013). Nenhum dos autores citados apresenta a espécie de madeira que deu origem às amostras de carvão analisadas em seus estudos.

2.5 DEGRADAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA COM A TEMPERATURA

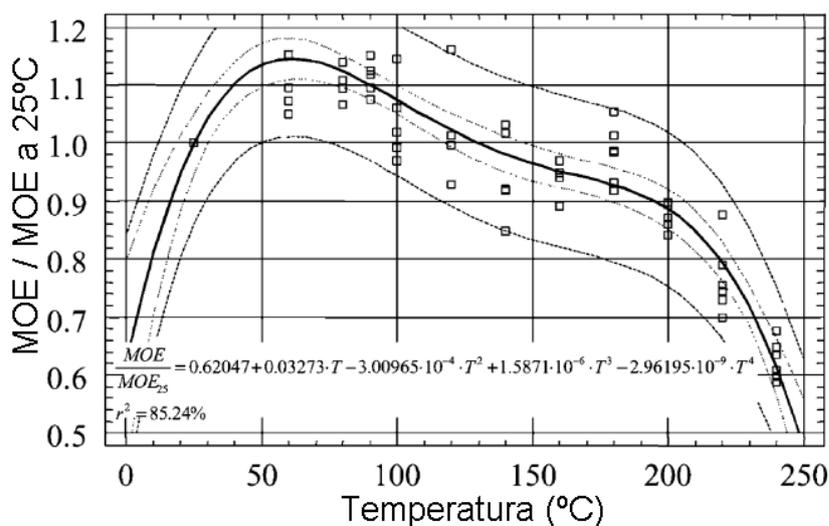
A madeira sofre um processo de degradação térmica que faz com que características sejam alteradas (teor de umidade, abertura de fendas, liberação de gases), modificando também propriedades mecânicas (FIGUEROA, 2012). Essas alterações se dão por conta da degradação de polissacarídeos da madeira com o aumento da temperatura (SILVA, 2012). Rocha (2014) afirma que, a 100°C, já se constata degradação térmica da madeira e as altas temperaturas reduzem sua resistência. Para Sulzberger (1953), a temperatura afeta tanto as propriedades resistentes da madeira, que ela deve ser considerada fator importante para testes e cálculos. Quase todas as propriedades mecânicas da madeira melhoram quando se diminui sua temperatura (Gerhards, 1982).

2.5.1 Módulo de elasticidade

Moraes et al (2004) analisaram amostras de *Pinus sylvestris* sob condições de altas temperaturas – de 25°C a 300°C – para registrar alterações no módulo de elasticidade da madeira em decorrência do aumento de temperatura.

Constata-se aumento no módulo de elasticidade entre as temperaturas 25°C e 100°C, chegando ao máximo acréscimo de 12% (MORAES et al, 2004), conforme apresentado na Figura 9. Explica-se tal aumento por conta da evaporação da água presente na madeira conforme a temperatura é elevada, já que o decréscimo do teor de umidade causa aumento no módulo de elasticidade da madeira (MORAES et al, 2004).

Figura 9: Variação do módulo de elasticidade de *Pinus sylvestris* com a temperatura, em razão do seu módulo de elasticidade a 25°C



Fonte: Moraes et al (2004, tradução nossa)

Após a total perda de umidade da madeira, o módulo de elasticidade começa a decrescer com o aumento de temperatura, por conta da degradação dos polímeros da madeira (MORAES et al, 2004). A partir dos 200°C, o módulo de elasticidade é fortemente afetado pelo aumento de temperatura, passando de 87% a 61% do seu valor a 25°C entre as temperaturas 200°C e 240°C. Moraes et al (2004) traduzem o comportamento através da Equação 7:

$$\frac{MOE}{MOE_{25}} = 0,62047 + 0,03273 \times T - 3,00965 \times 10^{-4} \times T^2 + 1,5871 \times 10^{-6} \times T^3 - 2,96195 \times 10^{-9} \times T^4 \quad (7)$$

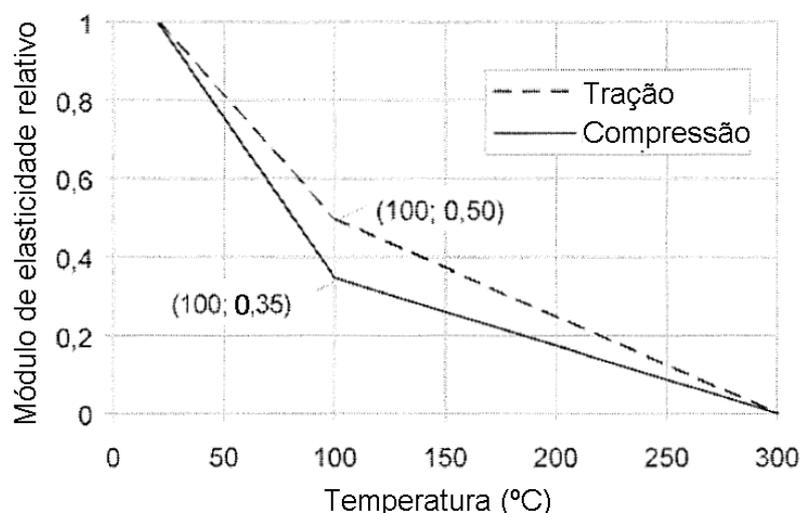
Sendo:

- MOE/MOE₂₅: A relação entre o módulo de elasticidade à temperatura T e o módulo de elasticidade a 25°C; e

- T: Temperatura, em °C.

O *Eurocode 5* aborda a alteração no módulo de elasticidade apenas para madeiras de árvores coníferas na direção das fibras, apresentando o gráfico da Figura 10, tanto para tração, como para compressão. O valor do eixo vertical do gráfico representa o módulo de elasticidade da madeira em relação à temperatura ambiente. Os valores do módulo de elasticidade são função da temperatura.

Figura 10: Efeito da temperatura no módulo de elasticidade paralelo às fibras para madeira de árvores coníferas



Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

2.5.2 Compressão paralela às fibras

Jiang et al (2014) testaram amostras de carvalho à compressão no sentido paralelo às fibras e verificaram que, para aumento de temperatura de 23°C a 220°C, o f_{c0} da madeira decaiu de 57,17 MPa para 18,86 MPa. Entre 110°C e 140°C, porém, as amostras apresentaram elevação na resistência à compressão, como mostram os resultados na Tabela 8.

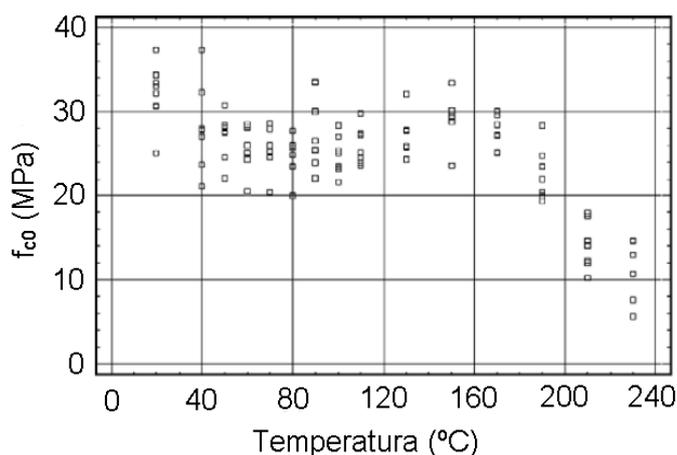
Tabela 8: f_{c0} da madeira de carvalho a temperaturas de 23°C a 220°C

Temperatura (°C)	23	50	80	110	140	170	200	220
f_{c0} (MPa)	57,17	44,89	34,16	33,47	44,36	36,86	28,86	18,86

Fonte: Adaptada de Jiang et al (2014)

Figuroa e Moraes (2010) apresentam tendência parecida em relação ao breve aumento de resistência à compressão da madeira ao ultrapassar a faixa dos 100°C, porém nos resultados apresentados por eles – originados em testes de madeira de paricá –, as perdas na resistência são proporcionalmente menores entre as temperaturas de 50°C e 150°C, ficando parecidas em diante. A Figura 11 mostra os resultados obtidos por Figuroa e Moraes (2010) em suas análises.

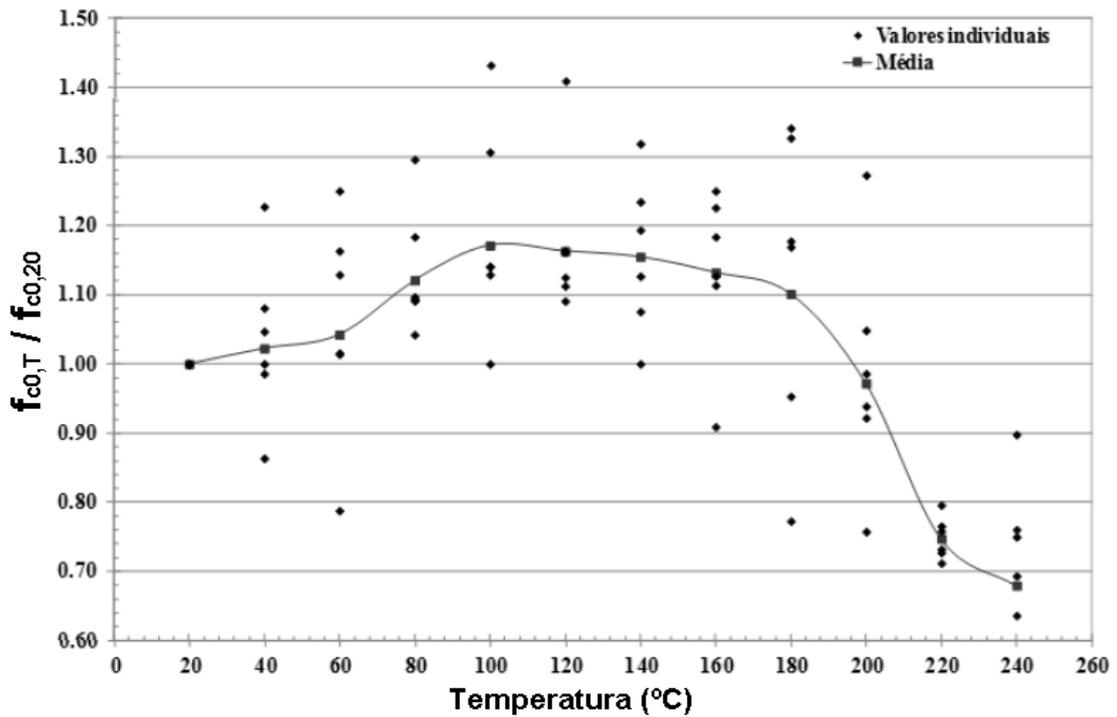
Figura 11: Resistência à compressão paralela às fibras da madeira de paricá



Fonte: Figuroa e Moraes (2010)

Carrasco et al (2016), por sua vez, apresentaram resultados que indicam aumento da resistência da madeira até a faixa dos 100°C, temperatura a partir da qual a madeira volta a perder resistência (sendo menor que a resistência à temperatura ambiente apenas a partir de aproximadamente 200°C). Os autores explicam que a umidade presente na madeira (11,14%) pode ser um fator prejudicial à sua resistência, e a perda de umidade com o aumento da temperatura faz oposição à degradação térmica que a madeira sofre. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos pelos autores no experimento com híbridos de duas espécies de eucalipto.

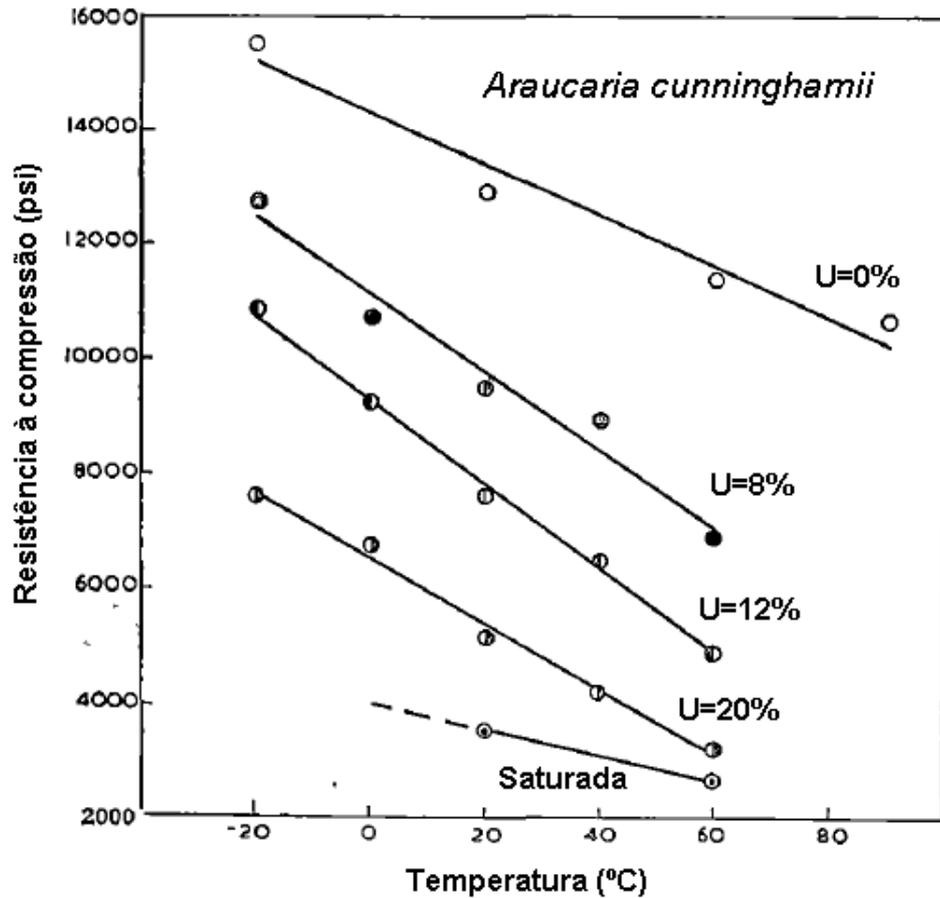
Figura 12: Resistência relativa à compressão paralela às fibras em função da temperatura



Fonte: Carrasco et al (2016)

Sulzberger (1953) apresentou dados que corroboram empiricamente com tal comportamento, visto que, em seus testes com amostras de madeira de diferentes espécies e a variadas condições de umidade, encontrou um comportamento padrão: a resistência da madeira à compressão decresce conforme maior é seu teor de umidade. A Figura 13 representa uma série de resultados encontrados pelo autor, estando a resistência à compressão paralela às fibras representadas pela unidade de medida libras por polegada quadrada (psi).

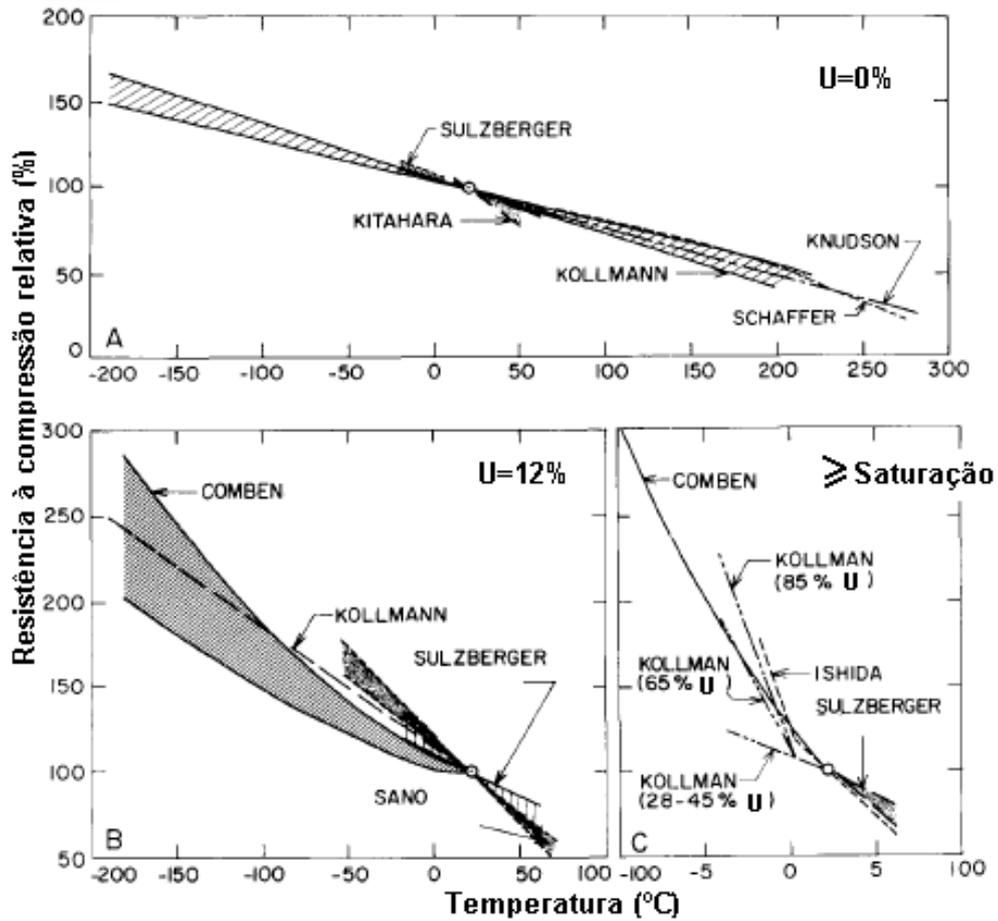
Figura 13: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: Adaptada de Sulzberger (1953)

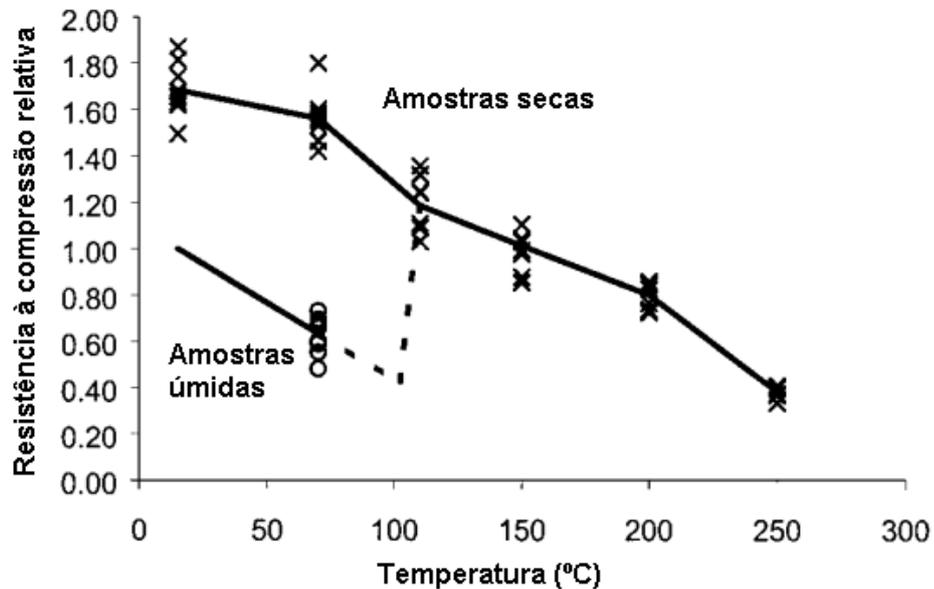
Gerhards (1982) apresenta um compilado de resultados de diversos autores sobre a influência da temperatura na compressão paralela às fibras de diferentes espécies de madeira. O autor identifica alterações mais significativas em amostras com maior umidade, como pode ser observado na Figura 14. Esse comportamento também foi encontrado por Young e Clancy (2001), que fizeram testes em amostras de pinus, tanto úmidas (U=12%) como secas (U=0%). Os resultados desses são apresentados na Figura 15, sendo que o fator 1,00 equivale a amostras com 12% de umidade à temperatura de 20°C.

Figura 14: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: Adaptada de Gerhards (1982)

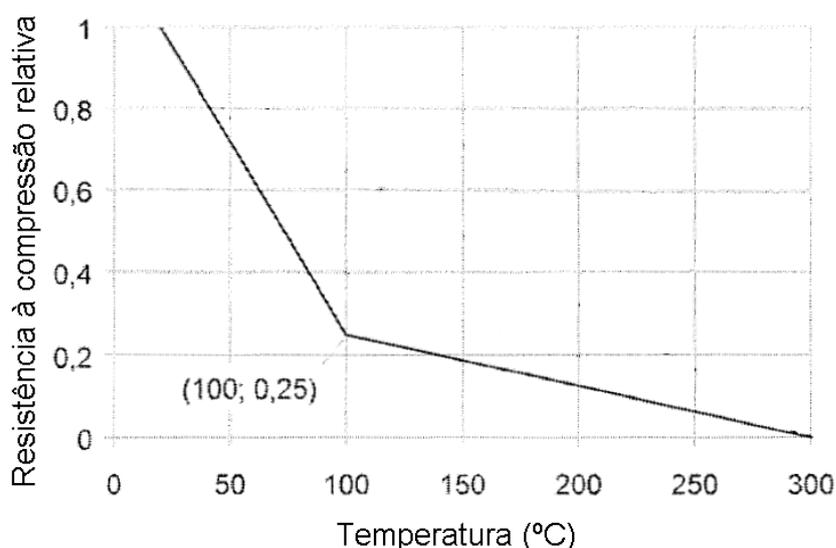
Figura 15: Resistência relativa à compressão paralela às fibras em razão da temperatura



Fonte: Young e Clancy (2001, tradução nossa)

O *Eurocode 5* fornece valores relativos de compressão paralela às fibras, como apresentado na Figura 16. Os valores são, de acordo com a norma, válidos apenas para madeiras originadas de árvores coníferas, e podem ser utilizados também para compressão perpendicular às fibras. O fator 1,0 atende à temperatura ambiente, sendo considerada igual a 20°C.

Figura 16: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras para madeira de árvores coníferas

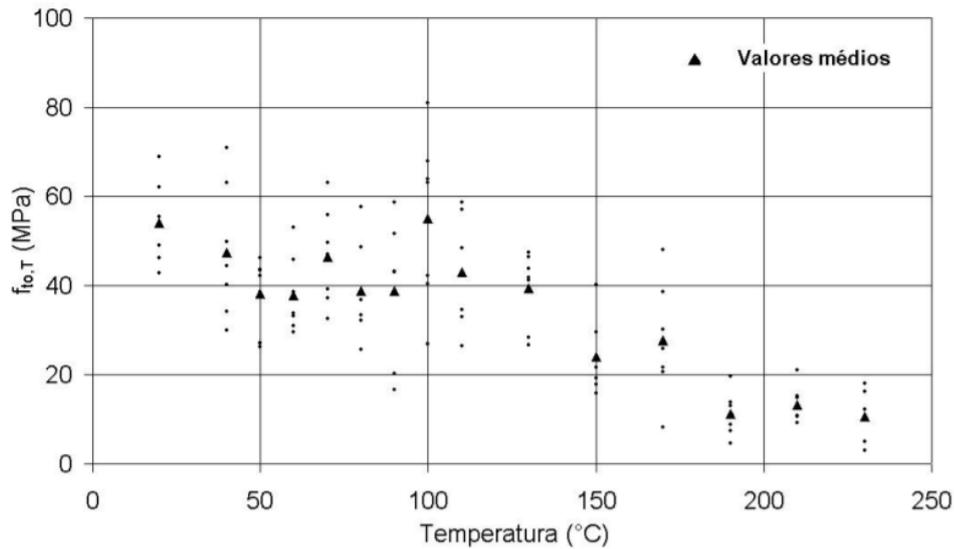


Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

2.5.3 Tração paralela às fibras

Figueroa (2008), em testes de tração paralela às fibras de madeiras de paricá, encontrou um comportamento similar ao encontrado por Figueroa e Moraes (2010) na compressão paralela às fibras: após baixa na resistência até temperaturas em torno de 80°C, há um aumento – sendo esse, no ensaio à tração, até a faixa dos 100°C. A partir dos 100°C, a resistência da madeira à tração paralela às fibras volta a diminuir, como ilustra a Figura 17.

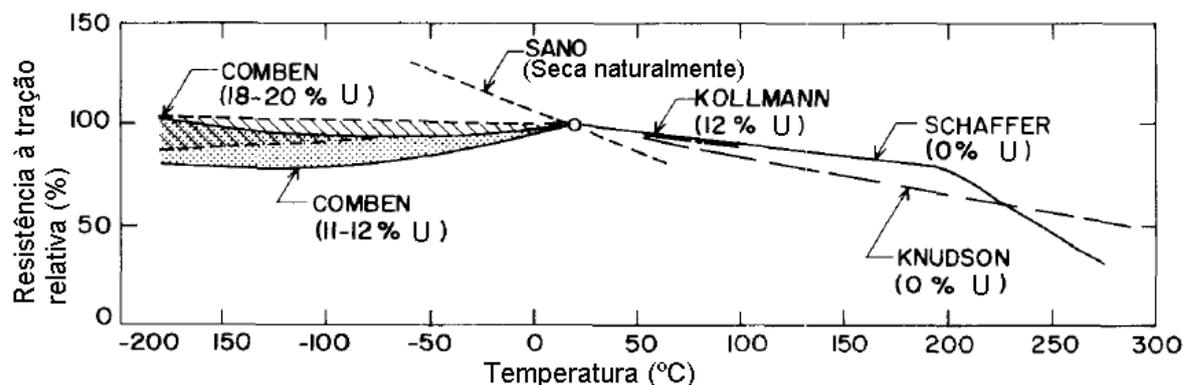
Figura 17: Resistência à tração paralela às fibras da madeira de paricá



Fonte: Figueroa (2008)

No compilado que Gerhards (1982) apresenta, há dois resultados apresentados para elevadas temperaturas acima de 100°C, sendo um linearmente constante (com madeira inicialmente a 12% de umidade) e outro também com comportamento linear, porém com queda mais brusca a partir da temperatura de 200°C (com madeira inicialmente a 0% de umidade). A Figura 18 mostra o comparativo entre os diferentes estudos.

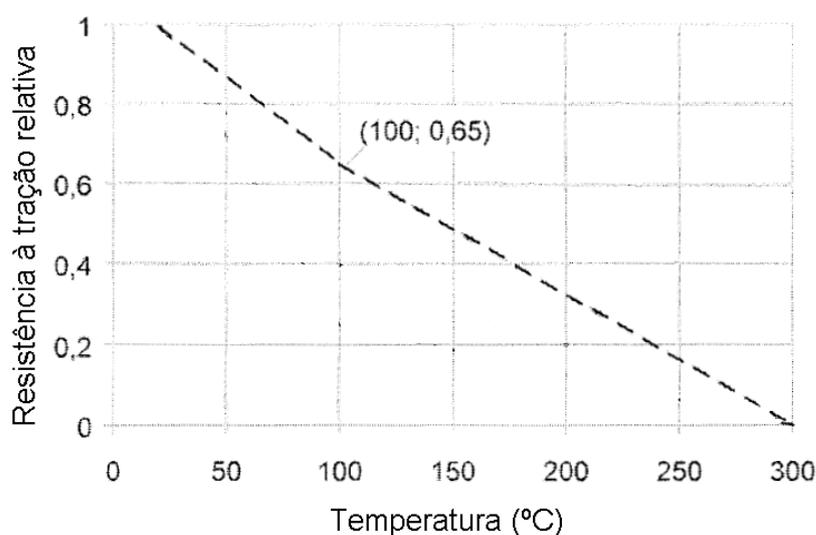
Figura 18: Efeito da temperatura na resistência à tração paralela às fibras



Fonte: Adaptada de Gerhards (1982)

O Eurocode 5, assim como para compressão, apresenta valores relativos de tração paralela às fibras. O fator igual a 1,0 representa a madeira a 20°C. Os valores, cuja alteração é representada na Figura 19, podem ser adotados apenas para madeiras com origem de árvores coníferas.

Figura 19: Efeito da temperatura na resistência à tração paralela às fibras para madeira de árvores coníferas

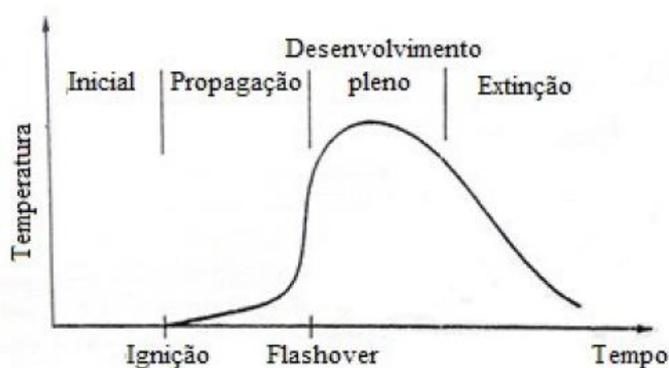


Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

2.6 PROCEDIMENTOS PARA PADRONIZAÇÃO DE TESTES DE INCÊNDIO

Por depender de muitos fatores – combustível, comburente, fonte de calor, reação em cadeia –, é complexa a apresentação de um modelo capaz de indicar como será a ocorrência de um incêndio para cada condição na qual ele acontece. Com a madeira sendo o produto que alimenta o fogo, dada a sua imprevisibilidade por ser um produto natural, é ainda mais difícil fazer uma previsão acertada. Apesar disso, é possível separar o incêndio em quatro fases: inicial, propagação, desenvolvimento pleno e extinção, como demonstra a Figura 20 (BUCHANAN, 2005 apud PERTILE, 2018).

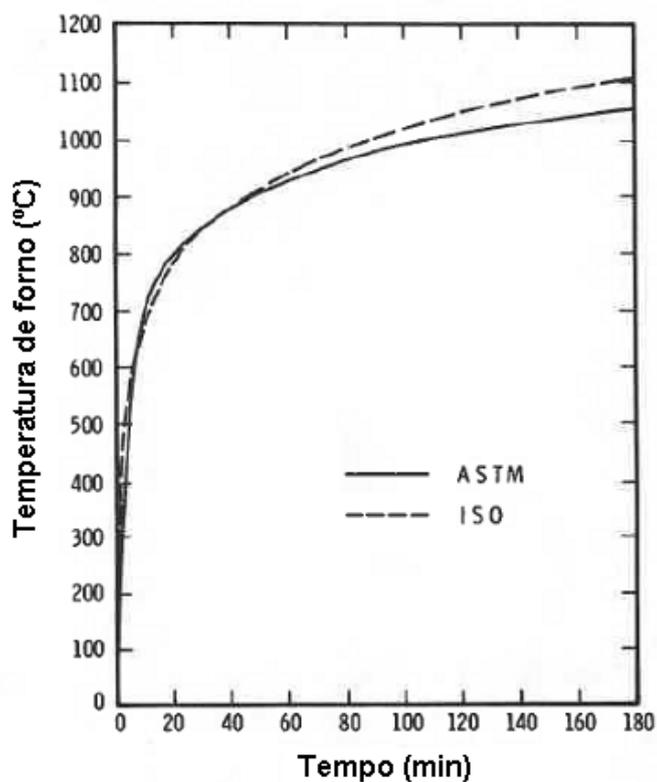
Figura 20: Evolução da temperatura do ambiente devida ao incêndio



Fonte: Buchanan (2005, apud PERTILE, 2018)

A ISO 834 (1999) apresenta uma curva padrão de temperatura de um incêndio ao longo do tempo. Essa curva é utilizada pelas normas europeias (entre elas a norma EN 1995-1-2:2004), assim como pela norma brasileira NBR 14432 (ABNT, 2001). Já a norma estadunidense se baseia na curva padrão apresentada na ASTM E119:2000 (PERTILE, 2018). Harmathy et al (1987) colocaram ambas as curvas de incêndio lado a lado para comparação, conforme Figura 21.

Figura 21: Comparação de curvas temperatura-tempo – ASTM E119 x ISO 834



Fonte: Harmathy (1987, tradução nossa)

Apesar de serem as curvas utilizadas por diversas normas regulamentadoras, Gernay e Franssen (2015) afirmam que elas não permitem análise dos elementos após seu resfriamento, o que pode colocar em risco a vida de pessoas que venham a usar a estrutura do edifício pós-incêndio, mesmo que seja para inspeção e recuperação da edificação.

2.7 MÉTODOS DO *EUROCODE 5* PARA VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A norma EN 1995-1-2 (2004), conhecida como *Eurocode 5*, propõe diferentes métodos de verificação de elementos de madeira durante incêndio, entre eles os métodos simplificados (da seção reduzida e da redução de propriedades) e os métodos de cálculos avançados (convenientemente utilizados com auxílio de *softwares*), para proteção passiva.

2.7.1 Método da seção reduzida

No método da seção reduzida, o *Eurocode 5* orienta a adoção de um valor extra na profundidade de carbonização, sendo a profundidade efetiva indicada pela Equação 8. O fator k_0 dessa equação tem valor igual a 1 para incêndios com duração maior ou igual a 20 minutos e igual a 0 para o tempo de incêndio de 0 minutos; o valor desse fator para incêndios com duração menor que 20 minutos deve ser adotado por interpolação linear.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (8)$$

Sendo:

- d_{ef} : profundidade de carbonização efetiva, em mm;
- $d_{char,n}$: profundidade de carbonização nominal, em mm;
- d_0 : 7 mm.

A seção transversal restante é igual à seção original com decréscimo das profundidades de carbonização efetivas nas faces expostas ao incêndio, sendo denominada de seção transversal efetiva pelo *Eurocode 5*.

Ressalta-se que o método de cálculo apresentado nesse subcapítulo é válido para elementos compostos puramente por madeira que não estejam protegidos por qualquer tipo de artifício que retarde a ação do fogo.

2.7.2 Método da redução de propriedades

O *Eurocode 5* recomenda a adoção do método da redução de propriedades para madeiras de árvores coníferas, não mencionando dicotiledôneas na abordagem do método. Ele consiste na adoção de um coeficiente $k_{mod,fi}$, que reduz as

propriedades mecânicas da madeira na verificação de sua resistência. O valor adotado para $k_{mod,fi}$ depende da natureza do esforço e é dado através das equações 9, 10 e 11.

$$k_{mod,fi} = 1,0 - p/(200 \times A_r), \text{ p/ esforço de flexão} \quad (9)$$

$$k_{mod,fi} = 1,0 - p/(125 \times A_r), \text{ p/ esforço de compressão} \quad (10)$$

$$k_{mod,fi} = 1,0 - p/(330 \times A_r), \text{ p/ esforço de tração e módulo de elasticidade} \quad (11)$$

Sendo:

- p: perímetro da seção residual, em metros; e
- A_r : área da seção residual, em m^2 .

Ressalta-se que o método de cálculo apresentado nesse subcapítulo é válido para elementos compostos puramente por madeira que não estejam protegidos por qualquer tipo de artifício que retarde a ação do fogo.

2.7.3 Métodos de cálculos avançados

Segundo o *Eurocode 5*, métodos de cálculos avançados podem ser aplicados à determinação da profundidade de carbonização, à evolução e à distribuição da temperatura no interior da seção e/ou à avaliação do comportamento estrutural como um todo ou como parte. Além disso, devem ser consideradas as dependências das propriedades físicas e mecânicas em relação à temperatura.

Para exposição padronizada ao fogo, o *Eurocode 5* orienta a adoção de valores conforme as Figura 5, Figura 6 e Figura 7 e Tabela 3 e Tabela 4.

2.8 MODELAGEM NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

Métodos de elementos finitos são usualmente empregados para resolver questões matemáticas que envolvem diversas variáveis em uma mesma equação, como problemas de transferência de calor (PURKISS, 2013). Para definição das temperaturas internas (representadas por isotermas) a determinados períodos e sob determinadas situações – como a exposição de um elemento ao fogo – em que não existe um comportamento linear, o método numérico de elementos finitos é requerido, pois existem diferentes variáveis que são interdependentes (PURKISS, 2013).

O uso do método de elementos finitos não busca um resultado exato, mas uma aproximação, visto que as ferramentas matemáticas existentes não são suficientes para encontrar um resultado exato na maioria dos problemas práticos. É possível fazer aproximações maiores conforme se investe maior esforço computacional sobre as análises de elementos finitos (RAO, 2018).

“Na análise térmica, as vigas são submetidas à elevação de temperatura caracterizada por uma curva temperatura x tempo” (PERTILE, 2018, p. 69). O *software* soluciona as equações de transferência de calor – sendo que há alteração em características do material como densidade, calor específico e condutividade térmica – em razão do aumento da temperatura, apresentando, por fim, o gradiente de temperatura (PERTILE, 2018).

A implementação de modelos em *softwares* numéricos avançados, como o Abaqus CAE, é uma forma de descrever mais precisamente o verdadeiro fenômeno físico por detrás da madeira em situação de incêndio (THI et al, 2017).

2.8.1 Considerações e resultados de diferentes autores

Pertile (2018) analisou numericamente vigas estruturais de MLC com e sem reforço (esses, ora de aço, ora de PRF). Estudos indicam que o comportamento de vigas de MLC é idêntico ao de vigas de madeira serrada, com exceção daquelas que contam com adesivo de caseína e à base de epóxi (PERTILE, 2018). Em seu estudo, Pertile (2018) utilizou o tempo máximo de análise de 40 minutos, com avanço a cada 10 segundos. A autora afirma que os valores das propriedades físicas da madeira foram igualmente adotados em todas as direções em decorrência de o *Eurocode 5* não especificar diferença entre elas (considera-se isotropia para as propriedades físicas da madeira). Ela afirma também que não se considera a geração interna de calor pois o *Eurocode 5* já considera o efeito na condutividade térmica da madeira.

A transferência de calor por convecção foi adotada como $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a superfície da madeira.

Pertile (2018) não segue a curva de aumento de temperatura apresentada pela ISO 834 (1999), em decorrência de seus testes se basearem em uma análise experimental previamente feita, na qual houve limitações provenientes da potência do forno utilizado.

No ensaio de Pertile (2018), a emissividade adotada foi a mesma orientada pelo *Eurocode 5*, constante e igual a 0,8. Condutividade térmica, calor específico e densidade variam de acordo com a temperatura, também sendo utilizados os valores do *Eurocode 5*.

Após os resultados térmicos da seção de madeira analisada numericamente serem obtidos, Pertile (2018) aproxima-se da resistência mecânica da seção através da estimativa de resistência mecânica de cada nó, estando esses submetidos à compressão ou à tração (dependendo da sua posição em relação à linha neutra, a qual é posicionada no método “tentativa e erro”).

Thi et al (2016) realizaram testes numéricos, ora considerando as três propriedades físicas da madeira – densidade, calor específico e condutividade térmica – como dependentes da temperatura, ora considerando o calor específico como constante, mantendo as outras duas propriedades como dependentes da temperatura. A diferença na abordagem do calor específico é devida à diferença de resultado de outros autores em relação ao *Eurocode 5*. Os autores ainda adotaram o valor de emissividade de 0,8, conforme orientado pelo *Eurocode 5*.

Thi et al (2017) simularam numericamente vigas de madeira em situação de incêndio a fim de comparação com testes experimentais realizados por Menis (2012, apud THI et al, 2017) e Lane (2005, apud THI et al, 2017). Os testes e as simulações foram realizados com corpos de prova de LVL e CLT e, para a modelação computacional, as seguintes considerações foram feitas: as amostras de LVL foram imputadas como meios contínuos homogêneos; as camadas de adesivo foram ignoradas em termos de condução, devido a sua espessura ser, em geral, menor que 0,2 mm; foi adotado comportamento isotrópico, devido à falta de diferença significativa entre as condutividades térmicas nas direções tangenciais e radiais das amostras de LVL. Além disso, Thi et al (2017) utilizaram os valores do *Eurocode 5* para considerar a alteração das propriedades físicas da madeira conforme a temperatura aumentava, apesar de verificarem, através da literatura, que os valores adotados pelo *Eurocode 5* não são um consenso na comunidade científica.

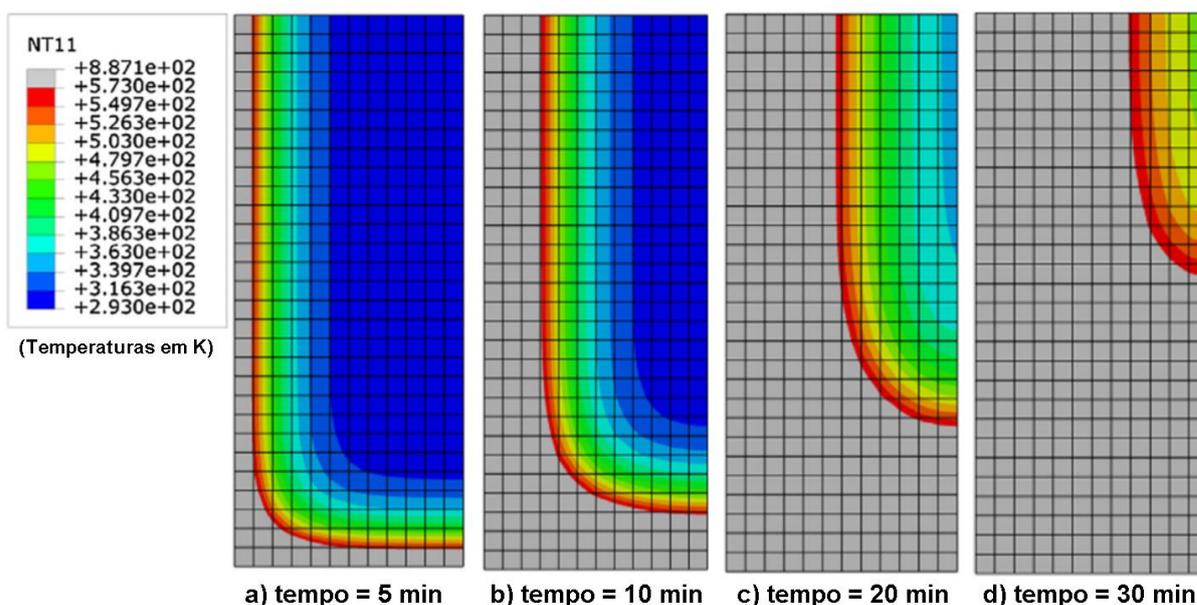
Apresenta-se os resultados dos distintos testes presentes na análise de Thi et al (2017): amostra de LVL testada em forno feito sob medida; amostra de LVL testada em forno piloto; teste de incêndio de larga escala em viga de CLT.

A caracterização da amostra de LVL testada em forno feito sob medida foi feita com teor de umidade de 12% e sua densidade relativa foi adotada como 570

kg/m³, sendo esse valor uma média entre todas as amostras experimentais. O aquecimento do forno aconteceu seguindo o indicado pela ISO 834 (1999).

A Figura 22 mostra os resultados numéricos obtidos pelos autores, sendo que a zona cinza apresenta temperatura acima dos 300°C (573 K), representando a camada na qual a madeira já passou a ser carvão ou deixou de existir, tendo resistência mecânica desprezível.

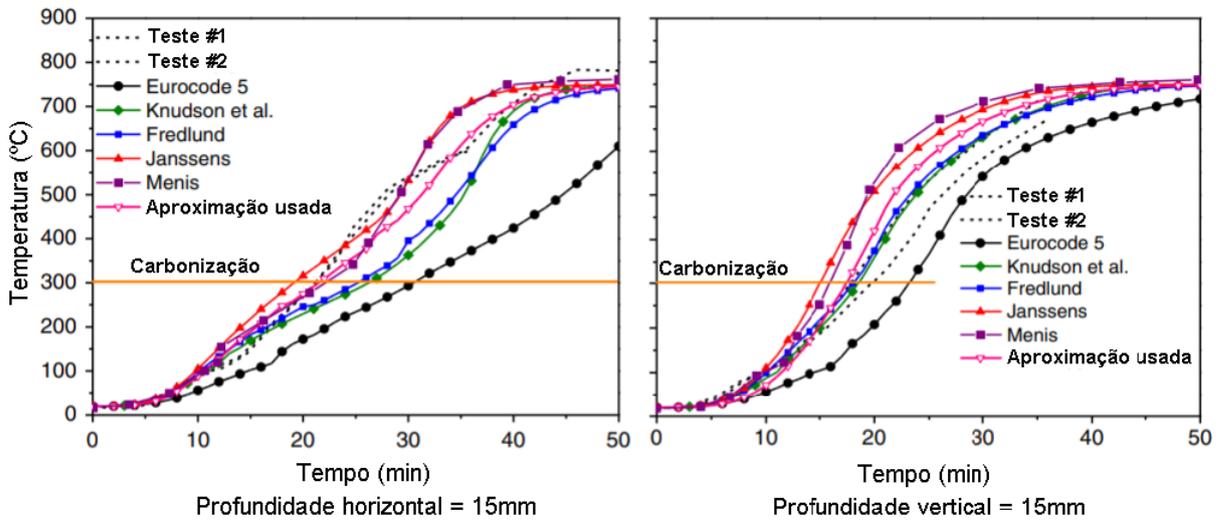
Figura 22: Formação de carvão em diferentes tempos de exposição ao fogo



Fonte: Adaptada de Thi et al (2017)

Thi et al (2017) também identificaram que a temperatura estimada pelo *Eurocode 5* à profundidade de 15mm da superfície após início do incêndio é subestimada em relação a testes experimentais encontrados na bibliografia. Eles acreditam que isso pode ter influência do pico do calor específico à temperatura de 100°C considerado pelo *Eurocode 5*, cujos valores não são consenso entre autores. A Figura 23 mostra essa diferença de resultados constatada.

Figura 23: Verificação da temperatura em pontos da seção aquecida

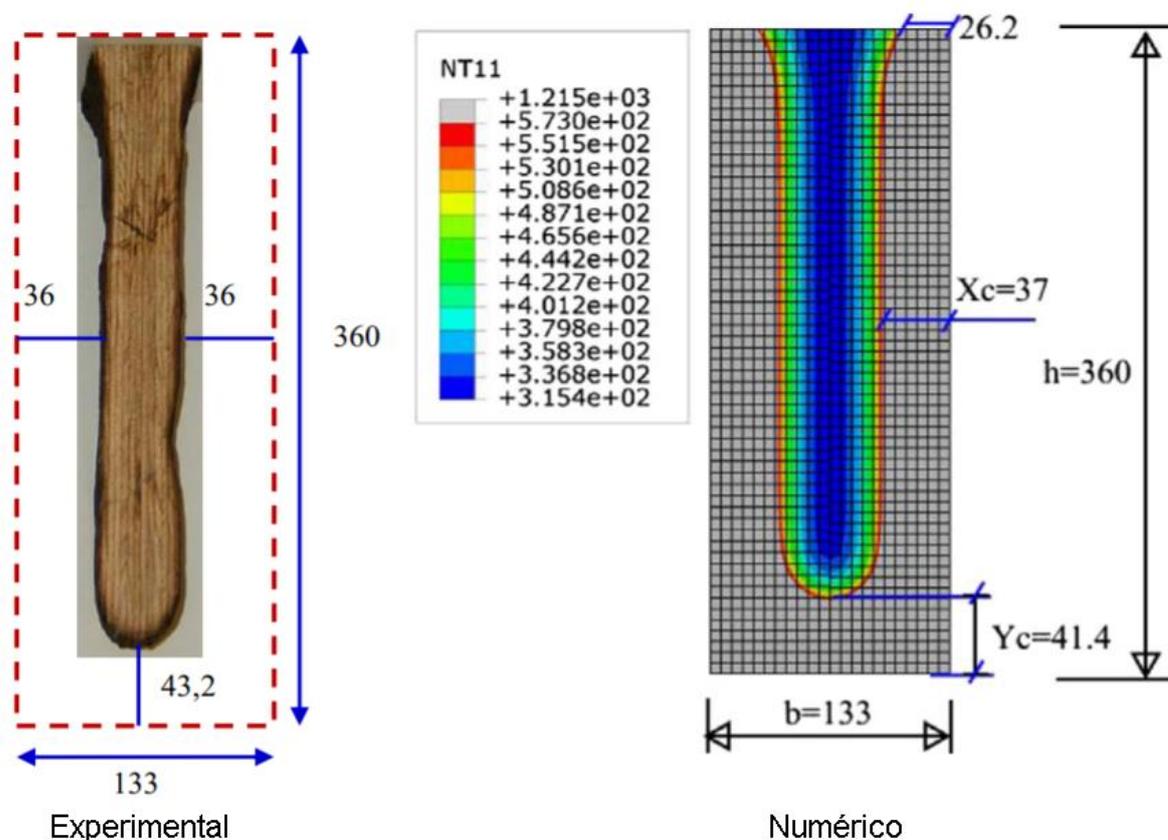


Fonte: Adaptada de Thi et al (2017)

Também sendo testada com aquecimento conforme curva da ISO 834 (1999), a viga de LVL testada em forno piloto teve proteção de placas de gesso com resistência ao fogo de 60 minutos na face superior, sendo exposta ao fogo em três das quatro faces. A madeira considerada na modelagem numérica contou com teor de umidade de 12% e densidade aparente de 610 kg/m^3 .

O resultado do teste através do método de elementos finitos demonstrou boa precisão em relação ao teste experimental, como representado na Figura 24 (as temperaturas são apresentadas em Kelvin). É possível notar a grande proximidade dos resultados nos diferentes testes, aumentando a confiabilidade do método computacional.

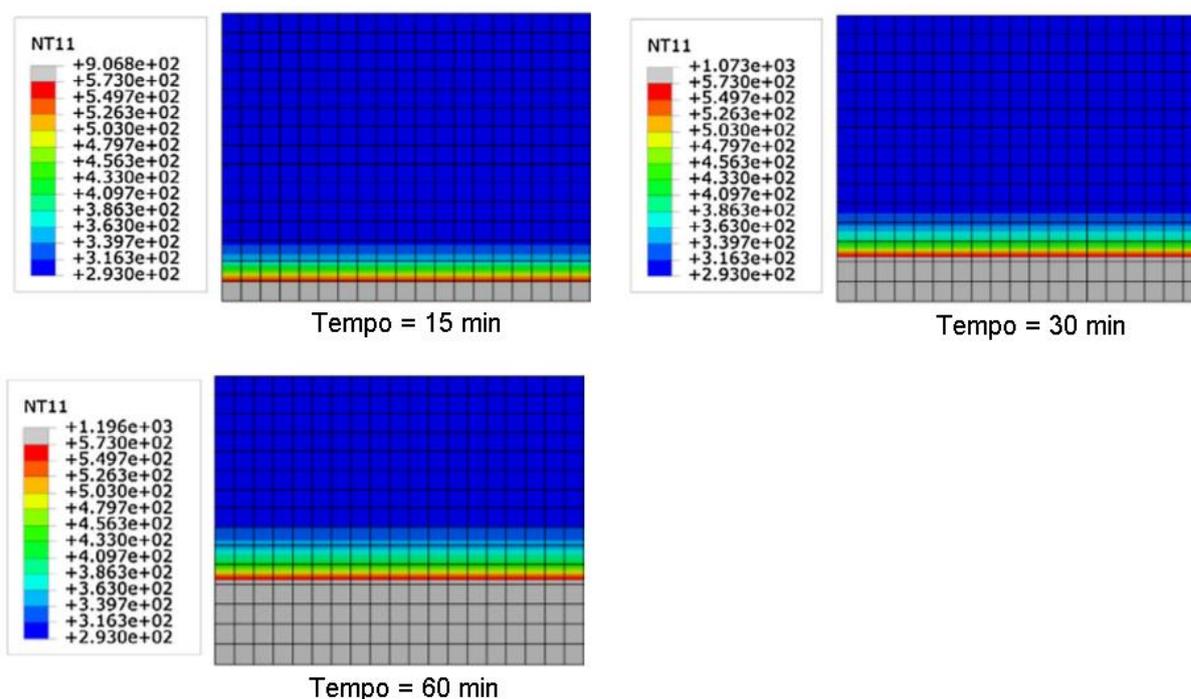
Figura 24: Comparação entre a seção residual prevista numericamente e a seção residual observada experimentalmente no tempo de 60 minutos



Fonte: Thi et al (2017, tradução nossa)

Na viga de CLT, o teor de umidade testado foi de 12%, sendo a densidade aparente dela de 460 kg/m^3 . O aquecimento foi feito de acordo com a curva proposta pela ISO 834 (1999) e os resultados mostraram, como esperado pelos autores, que a camada de carvão fica mais espessa conforme o tempo de exposição ao fogo aumenta, como se pode observar na Figura 25 (as temperaturas são apresentadas em Kelvin).

Figura 25: Formação de camada carbonizada em diferentes tempos de exposição ao fogo para amostras de CLT



Fonte: Thi et al (2017, tradução nossa)

Fonseca et al (2020) elaboraram um modelo numérico para verificar o efeito da densidade em conexões madeira-aço-madeira. Para caracterizar a madeira, os autores adotaram as tendências de alteração de propriedades físicas da madeira como orienta o *Eurocode 5*. A emissividade do material também foi o mesmo adotado pela norma, sendo igual a 0,8, e a temperatura de pirólise, a partir da qual a madeira não apresenta resistência mecânica significativa, igual a 300°C, seguindo a tendência da literatura e da norma europeia.

A curva de aquecimento utilizada por Fonseca et al (2020) foi a da ISO 834 (1999) e o coeficiente de convecção adotado para a superfície foi igual a 25 W/m²K.

Ao buscar a verificação do efeito da densidade em conexões de madeira com presença de aço através do método de elementos finitos, Fonseca et al (2020) verificaram que a densidade da madeira influencia a taxa de carbonização que decorre da ação do aquecimento do elemento. Para madeira com densidade de 480 kg/m³ ao teor de umidade de 0%, por exemplo, a taxa de carbonização chegou a ser pouco mais de 15% menor do que a taxa de madeira com densidade de 370 kg/m³ a 0% de umidade (FONSECA et al, 2020).

Quiquero et al (2019) modelaram no *software* Abaqus/Standard vigas de madeira com sistemas de protensão e as verificaram a temperatura ambiente e sob efeito de aquecimento conforme curva orientada pela ISO 834 (1999). Os autores adotaram os mesmos valores fornecidos pelo *Eurocode 5*, tanto no quesito de modificação das propriedades físicas em relação ao aumento de temperatura, como no valor da emissividade da madeira. Os autores utilizaram refinamento de malha de 9 mm, 5 mm, 3 mm e 1 mm e concluíram que a variação de resultados era muito baixa em relação ao maior tempo de esforço computacional, sendo desnecessário adotar as malhas mais finas dentre as analisadas.

Ao final do estudo, Quiquero et al (2019) compararam os resultados com testes experimentais realizados por Costello (2013, apud QUIQUERO et al, 2019) e Spellman (2012, apud QUIQUERO et al, 2019). Os autores verificaram “precisão impressionante” entre o cenário modelado numericamente e os resultados experimentais no que diz respeito ao comportamento mecânico dos elementos, porém notaram que a taxa de carbonização do modelo computacional foi sempre levemente menor quando comparado ao experimental. Eles mencionam a hipótese de que a baixa diferença pode ser decorrente da continuação da carbonização na fase de resfriamento ao término do ensaio experimental, fato não considerado no *software*.

3 METODOLOGIA

O estudo foi realizado com quatro tipos de madeira, com diferentes densidades na umidade padrão ($U=12\%$): *Pinus elliotti* (560 kg/m^3), *Pinus taeda L.* (645 kg/m^3), *Eucalyptus saligna* (731 kg/m^3) e *Tabebuia serratifolia* (1.068 kg/m^3). A escolha dessas quatro espécies se deu em razão da usabilidade em território nacional e faixas de densidade. Os valores da densidade de cada espécie foram extraídos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Todas as vigas foram analisadas tendo seção inicial de 30 cm de largura e 60 cm de altura, com valores médios de propriedades mecânicas conforme a Tabela 9, juntamente às nomenclaturas adotadas para cada viga, as quais norteiam a apresentação dos resultados e discussões desse estudo.

Tabela 9: Valores médios de madeiras nativas e de florestamento

Espécie	$\rho_{ap} (12\%)$ (kg/m^3)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	Nome da Viga
<i>Pinus elliotti</i>	560	40,4	66,0	V#1-PE-560
<i>Pinus taeda L.</i>	645	44,4	82,8	V#2-PT-645
<i>Eucalyptus saligna</i>	731	46,8	95,5	V#3-ES-731
<i>Tabebuia serratifolia</i>	1.068	76,0	96,8	V#4-TS-1068

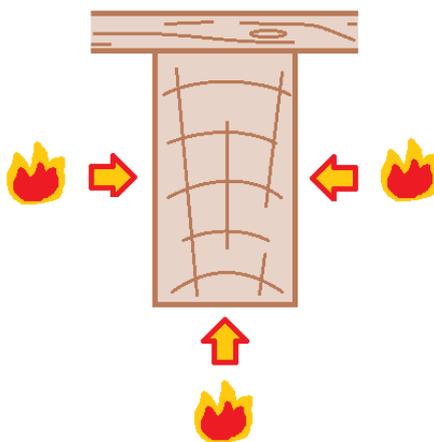
Fonte: Adaptada de NBR 7190 (ABNT, 1997)

Para que não fossem feitas comparações adotando coeficientes de majoração e/ou minoração diferentes, ao invés de comparar os resultados de resistência das vigas expostas ao incêndio através dos métodos de cálculo da norma EN 1995-1-2 (2004) com resultados baseados nos métodos de cálculo à exposição normal da norma EN 1995-1-1 (2004), optou-se por fazer a substituição das vigas em situação normal de exposição por vigas em situação de incêndio no tempo de 0 min, chamado nesse documento de “instante inicial de incêndio”. Na prática, isso faz com que os coeficientes adotados para obtenção de todos os resultados sejam baseados nos mesmos critérios, trazendo uma visão mais realista dos efeitos que o incêndio causa na deterioração das vigas de madeira.

Portanto, inicialmente foi identificado o momento resistente destas seções no momento no qual o incêndio inicia, ou seja, no tempo 0 min. Na sequência, foram determinados os momentos resistentes nos tempos de 30, 60, 90, 120 e 150 min

para os métodos simplificados e, nos mesmos tempos, para o método de cálculo avançado, com exposição à curva de temperatura ISO 834 (1999). A consideração de exposição ao fogo é dada em três das quatro faces da seção da viga, conforme apresenta a Figura 26.

Figura 26: Exposição da viga ao incêndio



Os métodos utilizados para a determinação do momento fletor resistente ao incêndio são os métodos simplificados (método da seção reduzida e método da redução de propriedades) e método de cálculo avançado.

3.1 MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR)

As vigas foram verificadas nos tempos de resistência ao fogo estabelecidos. Calculou-se a profundidade de carbonização nominal $d_{char,n}$ para cada tipo de madeira, conforme o *Eurocode 5*. Na sequência, foi acrescido o valor de d_0 (igual a 7 mm para os incêndios com duração maior ou igual a 20 minutos), conforme orientado pelo *Eurocode 5*, apenas para as vigas analisadas ao tempo de incêndio diferente de 0 min. Foram estabelecidos, com esses resultados parciais, as seções efetivas de cada viga e, em seguida, calculada sua resistência à flexão.

3.2 MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP)

Nessa análise, foram adotados dois procedimentos: com e sem o arredondamento dos cantos. Para ambos, o procedimento foi de definição das seções residuais da viga para os tempos de duração de incêndio, seguido da

verificação do perímetro e da área da seção residual, passando pela adoção do $k_{mod,fi}$ para o esforço de natureza de flexão e, finalmente, resultando na resistência.

3.3 MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)

No método de cálculo avançado, o *software* Abaqus CAE, de processamento através de elementos finitos, foi utilizado. Nele, foram modeladas as seções transversais das vigas de madeira analisadas apenas com as propriedades de densidade e térmicas para obtenção das isotermas, sendo que os valores introduzidos se basearam nas normas NBR 7190 (ABNT, 1997) – densidade – e EN 1995-1-2 (2004) – variação da densidade, do calor específico e da condutividade térmica, todos em relação à temperatura.

Os parâmetros termomecânicos adotados foram extraídos do *Eurocode 5*. Para calor específico e condutividade térmica, os valores constantes nas Tabela 10 e Tabela 11 foram utilizados, fazendo uma adaptação para que as unidades de medida convergissem. Para a densidade, os valores da norma NBR 7190 (ABNT, 1997) foram adaptados ao *Eurocode 5* e são apresentados na Tabela 12.

Tabela 10: Calor específico da madeira em relação à temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ / kg.°C)
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: EN 1995-1-2 (2004)

Tabela 11: Condutividade térmica da madeira em relação à temperatura

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W / m.K)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Fonte: EN 1995-1-2 (2004, tradução nossa)

Tabela 12: Densidade de cada espécie de madeira em relação à temperatura

Temperatura (°C)	Densidade relativa	Densidade (kg/m ³)			
		<i>P. ellioti</i>	<i>P. taeda L.</i>	<i>E. saligna</i>	<i>T. serratifolia</i>
20	1,12	560	645	731	1.068
99	1,12	560	645	731	1.068
120	1	500	575,9	652,7	953,6
200	1	500	575,9	652,7	953,6
250	0,93	465	535,6	607	886,8
300	0,76	380	437,7	496	724,7
350	0,52	260	299,5	339,4	495,9
400	0,38	190	218,8	248	362,4
600	0,28	140	161,3	182,8	267
800	0,26	130	149,7	169,7	247,9
1.200	0,0001*	0,1*	0,1*	0,1*	0,1*

* A densidade a 1.200°C, de acordo com o *Eurocode 5*, é nula, porém o *software*

Abaqus/CAE não aceita valores nulos para esse tipo análise, sendo necessário adotar valores próximos a zero para que ele consiga processar o programa modelado.

Fonte: Elaborada pelo Autor, adaptando de NBR 7190 (ABNT, 1997) e EN 1995-1-2 (2004)

O aquecimento utilizado no ensaio numérico foi o da ISO 834 (1999), por ser a curva de aquecimento padrão indicada pelo *Eurocode 5* e pela norma NBR 5628 (ABNT, 2001). A emissividade térmica da madeira adotada foi de 0,8, conforme orienta o *Eurocode 5*, com elemento sólido de malha de 1 cm x 1 cm x 1cm (formato hexaédrico de 8 nós), escolhida após análise de malha.

Nas faces da viga aquecidas, foram inseridos os dados referentes à curva de aquecimento da ISO 834 (1999), transmitidos por radiação, além de se considerar a mesma progressão de temperatura para a exposição superficial, e estabelecido coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Na face da viga não aquecida, a exposição superficial adotada foi constante e igual a 25°C .

O *software* Abaqus CAE, após a inserção desses dados, traçou isotermas que representam a distribuição de calor dentro da seção modelada. O valor de isoterma equivalente à temperatura de 300°C foi considerado o limite entre a seção residual e a camada carbonizada, seguindo o que afirma o *Eurocode 5* e é massivamente adotado pela literatura. A parte com temperatura maior que 300°C foi desconsiderada do cálculo de resistência mecânica por corresponder a carvão ou material esvaído.

Com a seção transversal definida, foram adotados os valores de $k_{\text{mod,fi}}$ segundo o *Eurocode 5* e, juntamente com os dados da seção residual, foi calculada a resistência mecânica de cada viga modelada.

3.4 PROPOSTA DE EQUAÇÃO PARA CÁLCULO SIMPLIFICADO

Com os resultados dos métodos simplificados e do método avançado de cálculo, propostos pelo *Eurocode 5*, juntamente às equações apresentadas pelas normas estadunidense NDS (AWC, 2017) e australiana AS1720.4 (AS, 2018), buscou-se propor uma equação que satisfizesse as influências da densidade e do tempo de incêndio sobre a taxa de carbonização da madeira.

Essa proposta foi feita introduzindo a equação da norma australiana – que resulta na taxa de carbonização em função da densidade da madeira – na equação da norma estadunidense – que resulta na profundidade de carbonização em função da taxa de carbonização e do tempo. Dessa forma, a profundidade de carbonização ficou em função diretamente da densidade da madeira e do tempo de ocorrência do incêndio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 ANÁLISE NO INSTANTE INICIAL DE INCÊNDIO

O cálculo de resistência à flexão das vigas no instante inicial de incêndio é detalhado no Apêndice A, enquanto os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resistência à flexão no instante inicial de incêndio

Viga	Resistência à flexão (kN.m)	
	Método da seção reduzida	Método da redução de propriedades
V#1-PE-560	727,2	696,9
V#2-PT-645	799,2	765,9
V#3-ES-731	842,4	807,3
V#4-TS-1068	1.368	1.311

Salienta-se que, para os quatro resultados apresentados, a falha da seção ocorreu na extremidade comprimida, devido ao fato de a resistência da madeira à compressão ser menor do que sua resistência à tração.

É possível verificar diminuição de 4,2% da resistência à flexão quando é utilizado o método da redução de propriedades, sendo essa redução decorrente do valor de $k_{mod,fi}$, que é igual a 0,95833 para o perímetro e área da seção transversal das vigas. Apesar de saber que as vigas teriam dimensões e resistências semelhantes com os diferentes métodos nessa fase do incêndio, optou-se por manter os valores de resistência desiguais, preservando as orientações de cálculo da norma EN 1995-1-2 (2004).

4.2 VERIFICAÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

4.2.1 Método da seção reduzida

Os cálculos das resistências à flexão das vigas nos tempos de incêndio de 30, 60, 90, 120 e 150 min, de acordo com o método da seção reduzida, resultaram nos valores apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da seção reduzida

Viga	Resistência à flexão (kN.m)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	518,8	380	259,5	156,3	69,3
V#2-PT-645	570,2	417,6	285,2	171,8	76,2
V#3-ES-731	655,9	538,1	430,9	333,6	246
V#4-TS-1068	1.065,1	873,9	699,7	541,8	399,4

Como o *Eurocode 5* estabelece valores de taxa de carbonização dependentes não da espécie, mas da classificação entre coníferas e dicotiledôneas, as espécies *Pinus elliotti* e *Pinus taeda L.* apresentaram, por meio desse método, resultados proporcionais na resistência à flexão, assim como a madeira de *Eucalyptus saligna*, quando em comparação à de *Tabebuia serratifolia*. A Tabela 15 apresenta a relação da resistência das vigas em cada tempo de incêndio, quando comparadas às vigas originais.

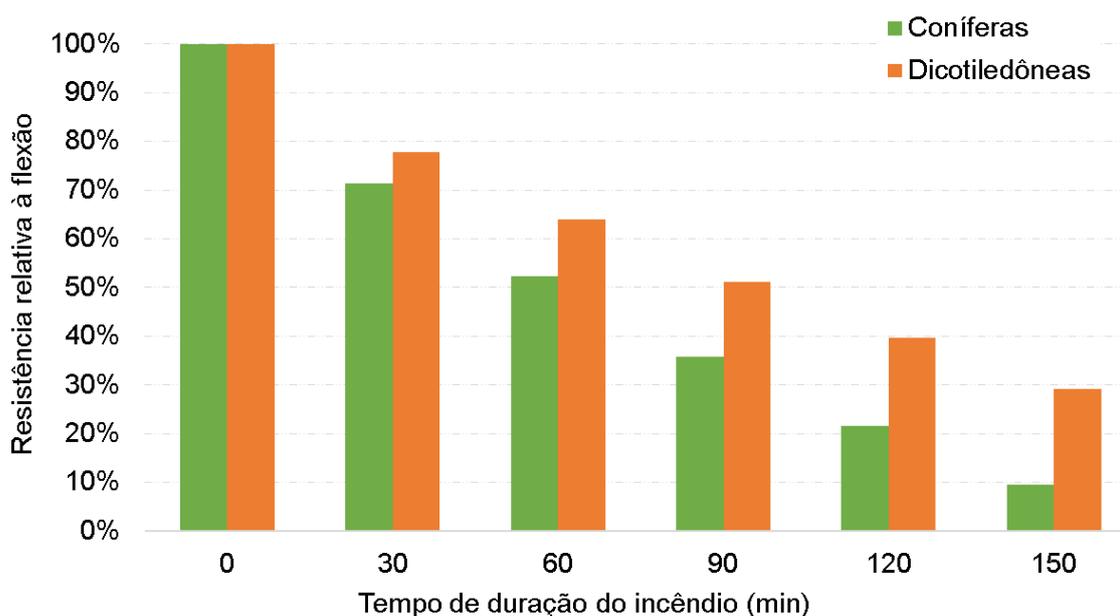
Tabela 15: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da seção reduzida

Viga	Perda de resistência à flexão em relação ao instante inicial				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	-28,7%	-47,7%	-64,3%	-78,5%	-90,5%
V#2-PT-645	-28,7%	-47,7%	-64,3%	-78,5%	-90,5%
V#3-ES-731	-22,1%	-36,1%	-48,9%	-60,4%	-70,8%
V#4-TS-1068	-22,1%	-36,1%	-48,9%	-60,4%	-70,8%

Como esperado, visto que a taxa de carbonização das coníferas é maior do que a das dicotiledôneas, o desempenho das primeiras foi pior, proporcionalmente, e

quanto maior o tempo de ocorrência de incêndio, maior essa diferença. Esse comportamento é justificado pela não linearidade entre as variações de seções e seus momentos de inércia, além do fato de que, proporcionalmente, largura e altura não são alteradas de forma equivalente (a não ser que fosse uma viga de seção quadrada exposta ao fogo nos seus quatro lados). O gráfico apresentado na Figura 27 ilustra essas diferenças.

Figura 27: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio



Verifica-se, portanto, que as dicotiledôneas apresentam melhor desempenho frente a incêndio de acordo com o método da seção reduzida, graças ao menor valor para sua taxa de carbonização.

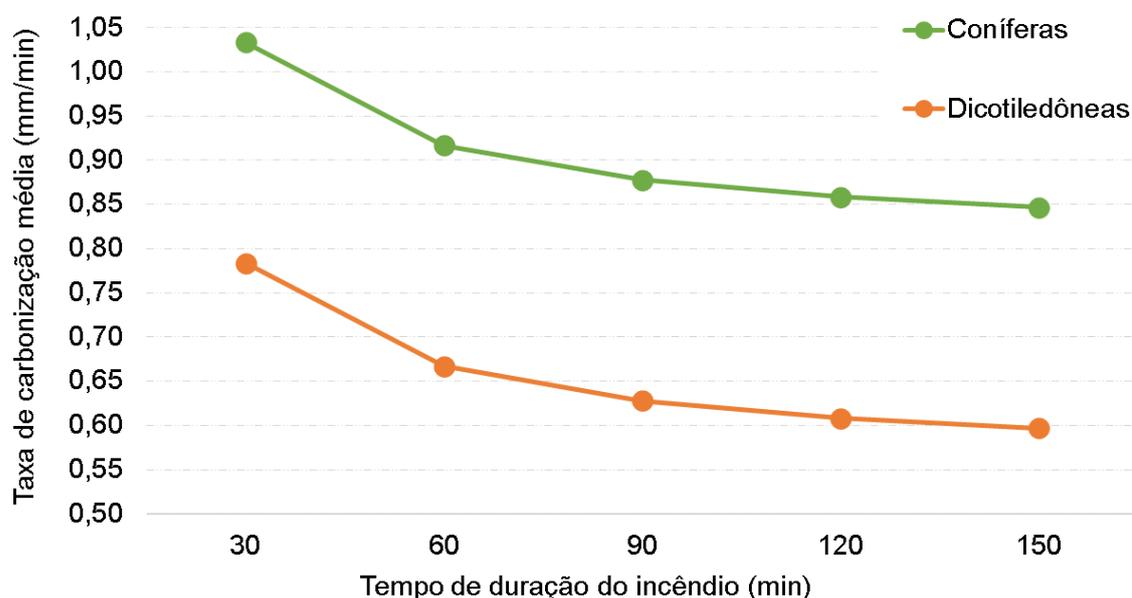
Como o *Eurocode 5*, para o método da seção reduzida, estabelece um valor de profundidade de carbonização efetiva com a adição de um valor invariável para incêndios a partir de 20 min, a taxa de carbonização média efetiva (isto é, a profundidade de carbonização efetiva dividida pelo tempo de incêndio), a partir desse tempo, muda de acordo com o tempo de exposição ao fogo adotado. A Tabela 16 apresenta os valores dessa taxa de carbonização média efetiva.

Tabela 16: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com o método da seção reduzida

Viga	Taxa de carbonização média (mm/min)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	1,03	0,92	0,88	0,86	0,85
V#2-PT-645	1,03	0,92	0,88	0,86	0,85
V#3-ES-731	0,78	0,67	0,63	0,61	0,6
V#4-TS-1068	0,78	0,67	0,63	0,61	0,6

Os valores da taxa de carbonização média tendem a atingir os valores de taxa de carbonização sugeridos pelo *Eurocode 5* no tempo infinito (0,80 mm/min para as coníferas e 0,55 mm/min para as dicotiledôneas), devido à diluição do valor adicional que a norma propõe para o cálculo da profundidade efetiva. O gráfico da Figura 28 ilustra essa tendência para os tempos analisados nesse documento.

Figura 28: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio



Nota-se, com esses resultados, que esse método apresenta valores maiores para taxas de carbonização médias conforme menor é o tempo de incêndio.

4..2.2 Método da redução de propriedades

O cálculos das resistências à flexão das vigas nos tempos de incêndio a partir de 30 min, de acordo com o método da redução de propriedades, é detalhado no Apêndice B, tanto para os cálculos sem consideração do efeito de arredondamento dos cantos (resultados apresentados na Tabela 17), como para os cálculos que consideram esse efeito (resultados apresentados na Tabela 18).

Tabela 17: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t, de acordo com o método da redução de propriedades (sem considerar arredondamento dos cantos)

Viga	Resistência à flexão (kN.m)				
	t = 30 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min
V#1-PE-560	535,7	394,2	271,3	165,8	76,6
V#2-PT-645	588,8	433,3	298,2	182,2	84,2
V#3-ES-731	676,4	556,5	447,2	347,9	258,4
V#4-TS-1068	1.098,5	903,8	726,2	565	419,6

Tabela 18: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t, de acordo com o método da redução de propriedades (considerando arredondamento dos cantos)

Viga	Resistência à flexão (kN.m)				
	t = 30 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min
V#1-PE-560	563,7	441,9	331,6	232,8	145,1
V#2-PT-645	619,5	485,6	364,4	255,8	159,5
V#3-ES-731	687,4	575,4	471,1	374,8	286,4
V#4-TS-1068	1.116,3	934,3	765,1	608,7	465,1

Como no método da seção reduzida, as espécies de coníferas apresentaram, por meio desse método, resultados proporcionais na resistência à flexão, assim como as madeiras de dicotiledôneas. As Tabela 19 e Tabela 20 apresentam a relação da resistência das vigas em cada tempo de incêndio, quando comparadas às vigas no instante inicial de incêndio.

Tabela 19: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da redução de propriedades (sem considerar arredondamento dos cantos)

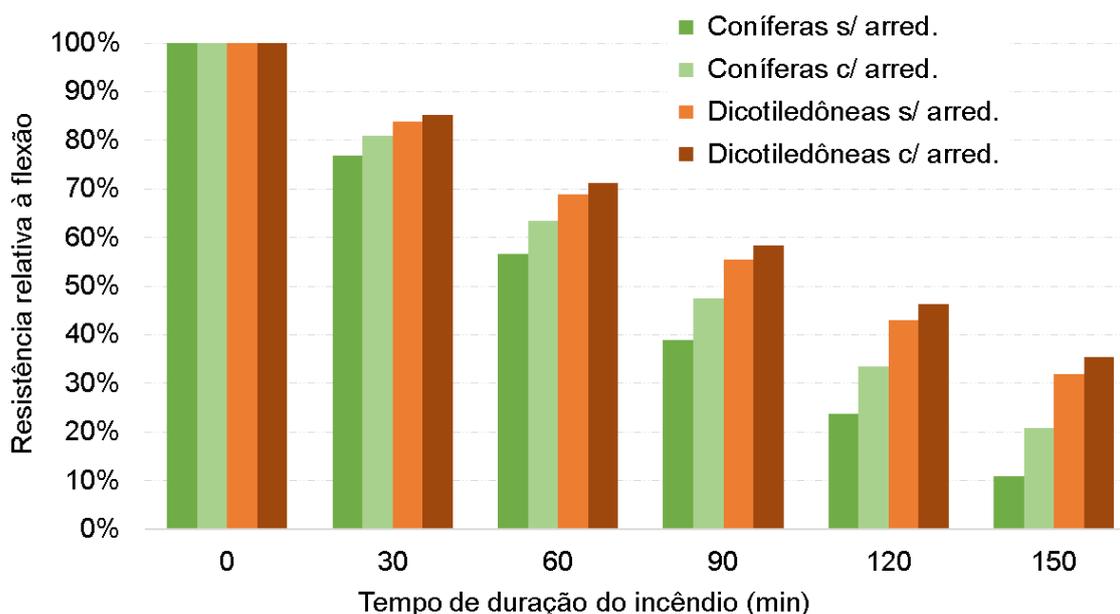
Viga	Perda de resistência à flexão em relação ao instante inicial				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	-23,1%	-43,4%	-61,1%	-76,2%	-89%
V#2-PT-645	-23,1%	-43,4%	-61,1%	-76,2%	-89%
V#3-ES-731	-16,2%	-31,1%	-44,6%	-56,9%	-68%
V#4-TS-1068	-16,2%	-31,1%	-44,6%	-56,9%	-68%

Tabela 20: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método da redução de propriedades (considerando arredondamento dos cantos)

Viga	Perda de resistência à flexão em relação ao instante inicial				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	-19,1%	-36,6%	-52,4%	-66,6%	-79,2%
V#2-PT-645	-19,1%	-36,6%	-52,4%	-66,6%	-79,2%
V#3-ES-731	-14,8%	-28,7%	-41,6%	-53,6%	-64,5%
V#4-TS-1068	-14,8%	-28,7%	-41,6%	-53,6%	-64,5%

Para esse método de verificação, o desempenho das coníferas também foi pior, sendo que, de forma geral, o método de verificação que não considera o arredondamento dos cantos se mostrou mais conservador (tendo resultados de resistência menores para todos os tempos de incêndio analisados), podendo-se atribuir esse fato à mais baixa taxa de carbonização adotada para a não consideração do arredondamento. O gráfico da Figura 29 ilustra essas diferenças.

Figura 29: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio



A diferença de resultados entre as considerações também se mostrou maior para as madeiras coníferas. Essa diferença pode ser explicada pela grande diferença entre as taxas de carbonização adotadas para cada consideração: enquanto a taxa foi de 0,80 mm/min (sem arredondamento) para 0,65 mm/min (com arredondamento) para as coníferas, a mudança para as dicotiledôneas foi apenas de 0,55 mm/min (sem arredondamento) para 0,50 mm/min (com arredondamento).

A taxa de carbonização para o método da redução de propriedades é constante, independentemente do tempo de duração do incêndio.

4.2.3 Método de cálculo avançado

Com as isotermas extraídas do *software* Abaqus/CAE, foram analisadas as seções transversais das vigas de madeira expostas ao incêndio, adaptando os resultados ao método da redução de propriedades. As isotermas resultantes do *software* ao tempo de 90 min de incêndio são apresentadas para as espécies de *Pinus elliotti* na Figura 30, *Pinus taeda* L. na Figura 31, *Eucalyptus saligna* na Figura 32 e *Tabebuia serratifolia* na Figura 33.

Figura 30: Seção de *Pinus elliotti* no tempo de incêndio de 90 min

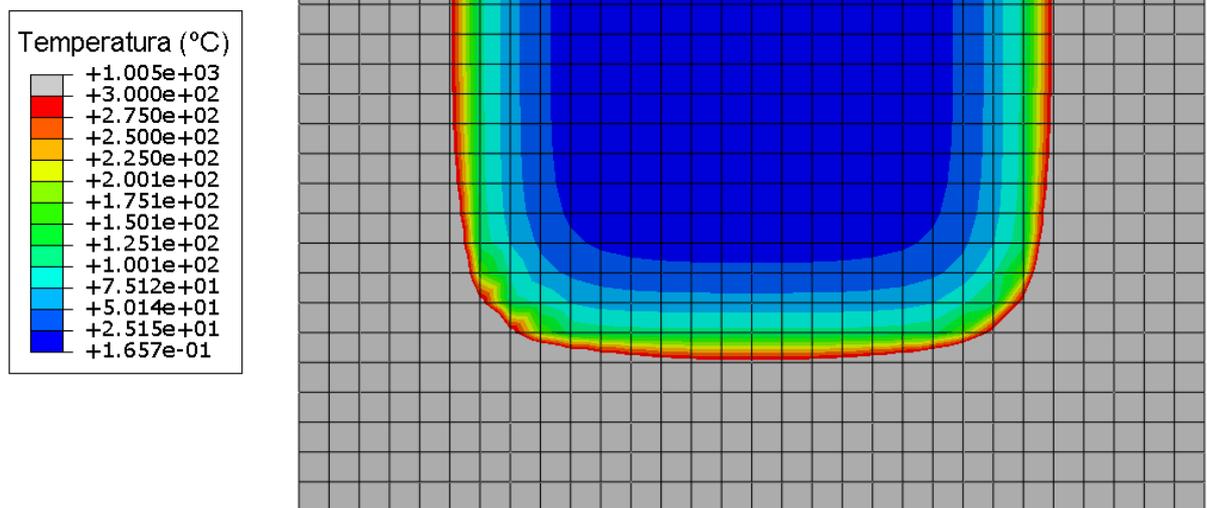


Figura 31: Seção de *Pinus taeda* L. no tempo de incêndio de 90 min

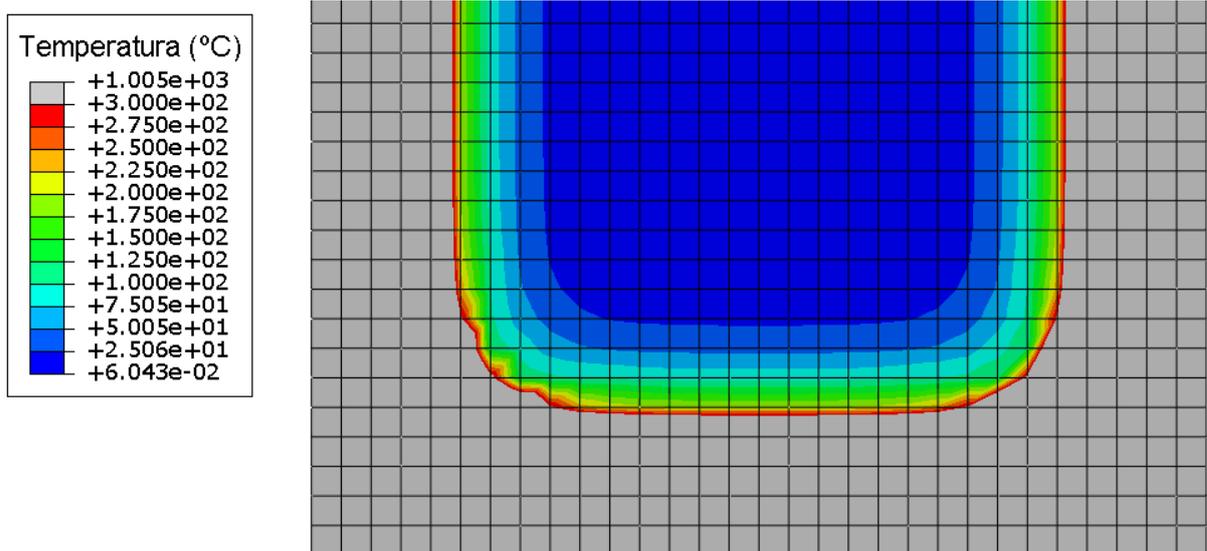


Figura 32: Seção de *Eucalyptus saligna* no tempo de incêndio de 90 min

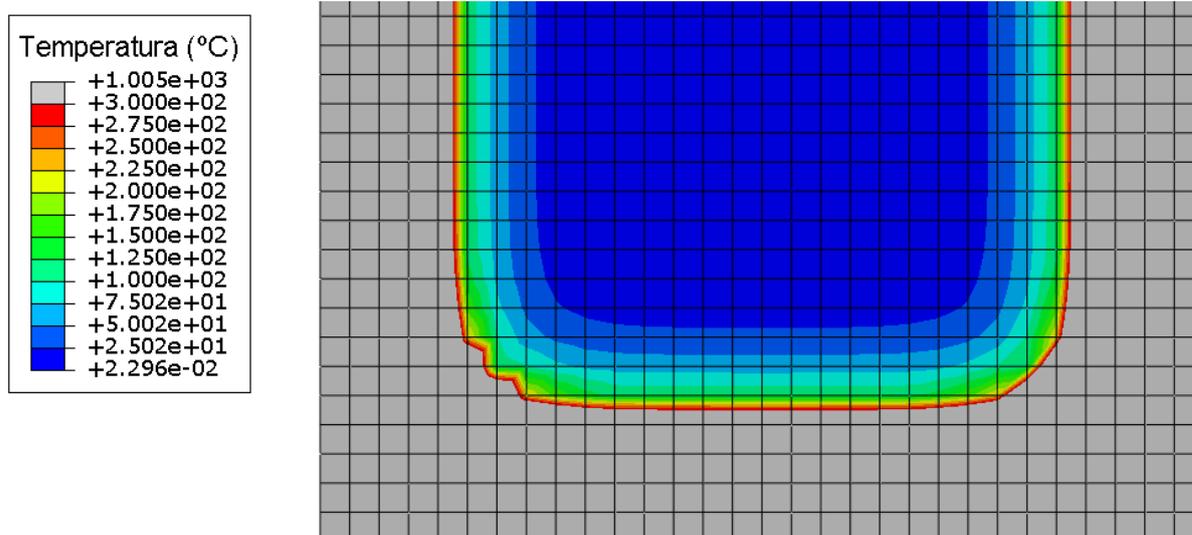
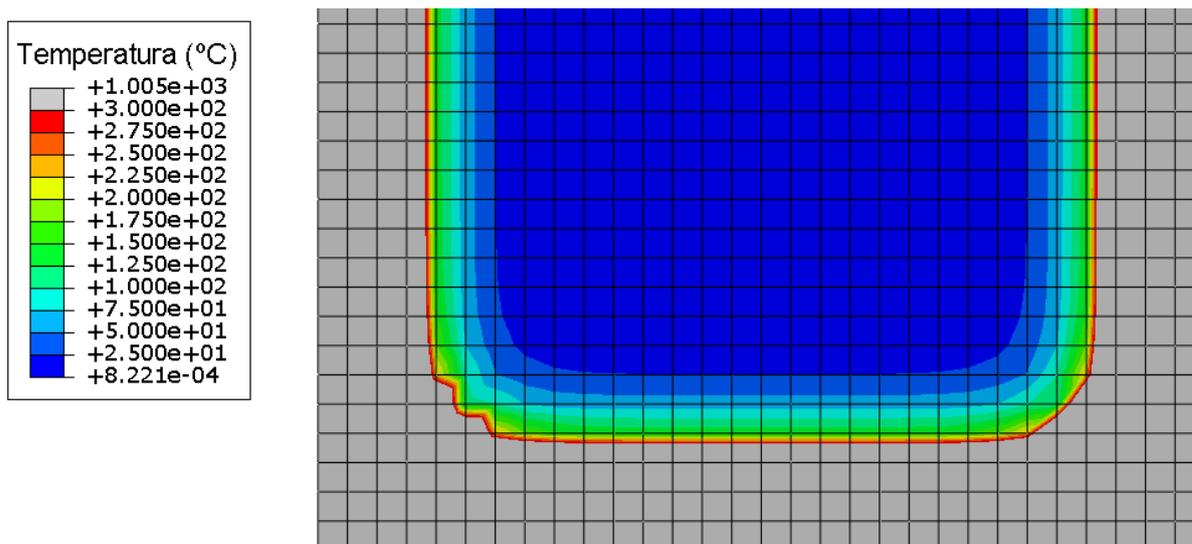


Figura 33: Seção de *Tabebuia serratifolia* no tempo de incêndio de 90 min



No tempo de incêndio de 90 min já foi possível identificar a diferença na profundidade de carbonização das madeiras de diferentes espécies, variando entre 36 mm (*Tabebuia serratifolia*) e 51 mm (*Pinus elliotti*). Como a única diferença nos dados de entrada do *software* foi a densidade da madeira, é claramente possível notar seu impacto na taxa de carbonização, sendo o aumento dela positivo para a resistência que a viga tem em degradar-se devido às altas temperaturas.

Os cálculos das resistências à flexão das vigas nos tempos de incêndio a partir de 30 min, de acordo com o método de cálculo avançado realizado, são detalhados no Apêndice B e os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com o método da seção reduzida

Viga	Resistência à flexão (kN.m)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	573,5	459,9	372,6	297,4	232,8
V#2-PT-645	637,6	518,8	434,4	355,6	282,5
V#3-ES-731	679,7	568,2	471,1	393,4	326,7
V#4-TS-1068	1.116,3	981,6	865,1	754,3	649,1

Diferentemente dos métodos simplificados do *Eurocode 5*, que atribuem taxa de carbonização dependendo da classificação da madeira, o método de cálculo avançado, por meio dos cálculos numéricos, apresentou resultados que expõem a influência da densidade da madeira na taxa de carbonização. Essa influência está atrelada ao conceito de difusividade térmica, que apresenta a densidade como uma de suas variáveis. A Tabela 22 apresenta a relação da resistência à flexão das vigas comparada à resistência no instante em que é iniciado o incêndio.

Tabela 22: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , em relação ao instante inicial de incêndio, de acordo com o método de cálculo avançado

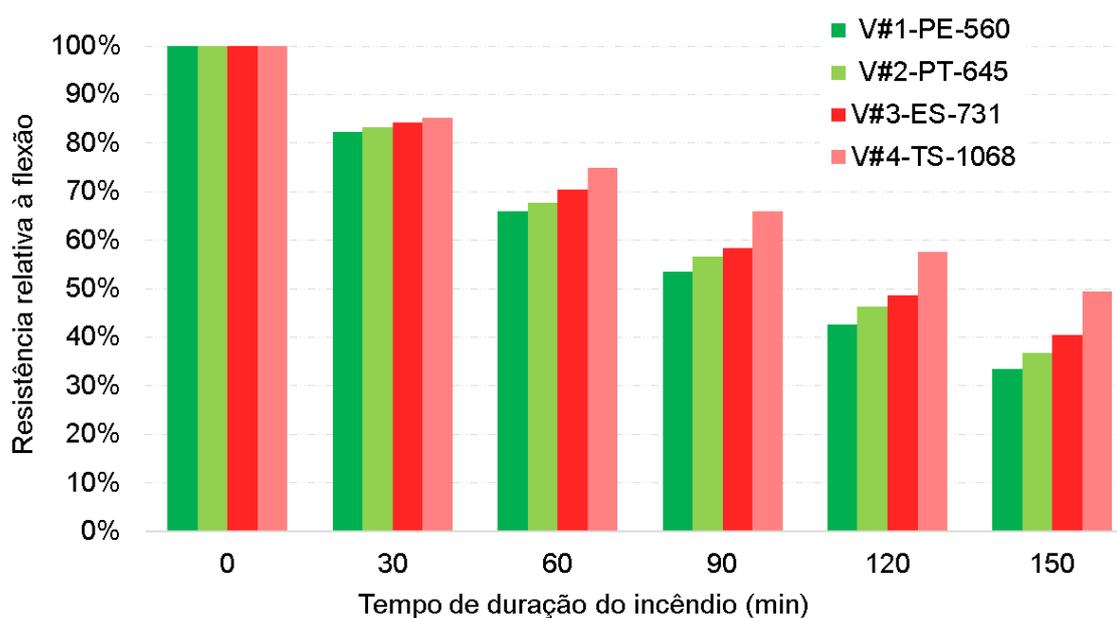
Viga	Perda de resistência à flexão em relação ao instante inicial				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	-17,7%	-34%	-46,5%	-57,3%	-66,6%
V#2-PT-645	-16,8%	-32,3%	-43,3%	-53,6%	-63,1%
V#3-ES-731	-15,8%	-29,6%	-41,6%	-51,3%	-59,5%
V#4-TS-1068	-14,8%	-25,1%	-34%	-42,5%	-50,5%

Convergindo com os resultados que indicam relação inversa entre densidade e taxa de carbonização e não linearidade entre as variações das seções e seus momentos de inércia, os resultados das relações apresentados mostram que as madeiras de maior densidade apresentam também, proporcionalmente, resultados mais elevados de resistência à flexão conforme o incêndio decorre por mais tempo.

Em relação aos resultados das verificações através dos métodos de seção reduzida e de redução de propriedades, em geral, o método de cálculo avançado se demonstrou menos conservador. Com exceção da resistência à flexão nos tempos

de incêndio de 30 e 60 min para as vigas de *Eucalyptus saligna*, os resultados do último método foram superiores. Essa relação, apesar de não analisada nesse documento, tende a se estender para outras espécies de madeiras dicotiledôneas com densidade igual ou menor à dessa espécie. O gráfico da Figura 34 demonstra as diferenças de relação de resistência à flexão obtidas através do método de cálculo numérico.

Figura 34: Relação de resistência à flexão das vigas ao longo do incêndio

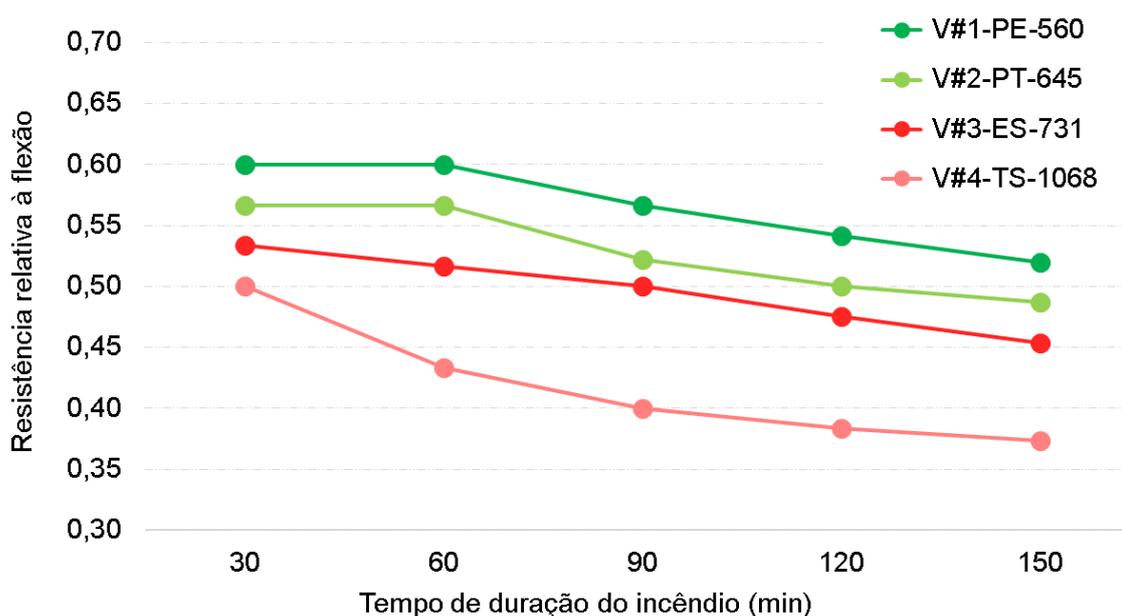


A taxa de carbonização média obtida para cada duração de incêndio e para cada espécie de madeira é apresentada na Tabela 23 e na Figura 35.

Tabela 23: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com o método de cálculo avançado

Viga	Taxa de carbonização média (mm/min)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
V#1-PE-560	0,6	0,6	0,57	0,54	0,52
V#2-PT-645	0,57	0,57	0,52	0,5	0,49
V#3-ES-731	0,53	0,52	0,5	0,48	0,45
V#4-TS-1068	0,5	0,43	0,4	0,38	0,37

Figura 35: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio



Além da influência da densidade sobre a taxa de carbonização, é possível perceber como a taxa de carbonização média decresce de acordo com maior duração de incêndio. Esses resultados refletem a maior condutividade da madeira, quando comparada ao carvão, conforme exposto pelo *Eurocode 5* e mencionado por Friquin (2011), que afirma que o carvão forma uma camada com maior capacidade térmica isolante, dificultando o aquecimento do interior da seção dos elementos de madeira. Por atingir uma velocidade de carbonização constante a partir dos 1.100°C (FRIQUIN, 2011), esse valor tende a ser constante no tempo infinito, corroborando também com o constatado por Mikkola (1991).

4.2.4 Comparativo entre métodos

Pôde-se observar diferenças significativas entre os resultados dos três métodos analisados nesse estudo, tanto em relação à variação da taxa de carbonização média, como em relação à perda de resistência das vigas de cada espécie.

Em termos de taxa de carbonização, nota-se que, dos três métodos, dois apresentam taxa de carbonização média variável de acordo com o tempo de exposição do elemento ao incêndio, reduzindo a taxa conforme aumenta o tempo de exposição. Para o método da redução de propriedades, a taxa de carbonização

média se manteve constante, sendo uma característica própria. Essa diferença pode ser identificada nos gráficos da Figura 36, da Figura 37, da Figura 38 e da Figura 39, que apresentam essas diferenças nos tempos de incêndio analisados para as diferentes espécies.

Figura 36: Taxa de carbonização média – *Pinus elliotti* (V#1-PE-560)

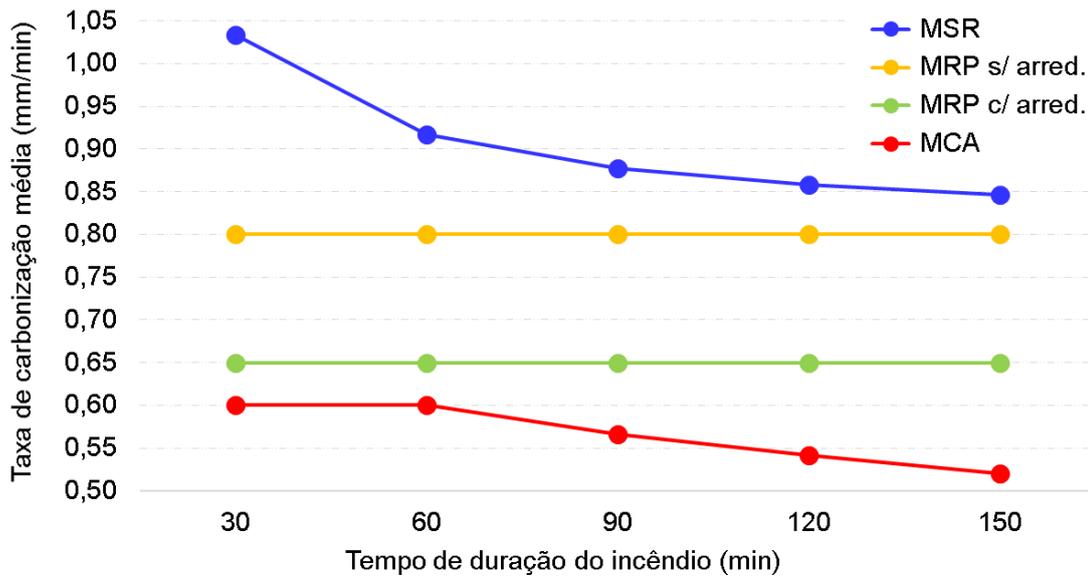


Figura 37: Taxa de carbonização média – *Pinus taeda* L. (V#2-PT-645)

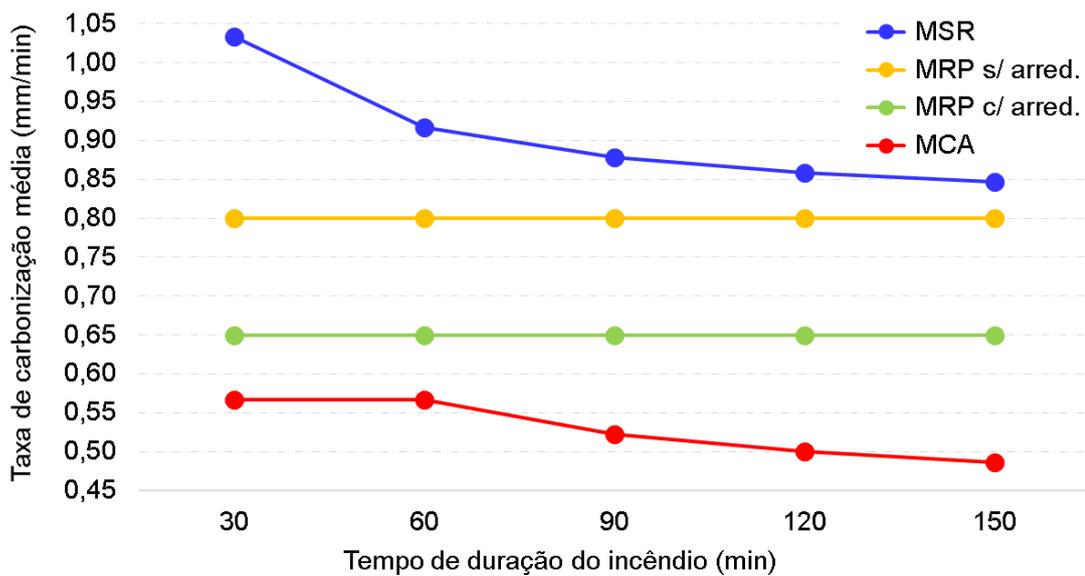
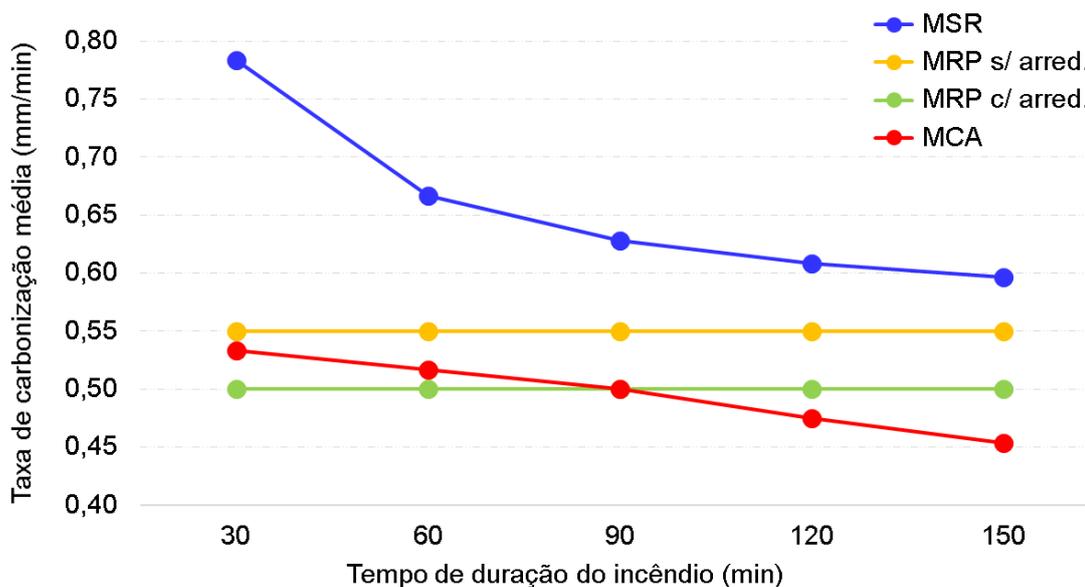
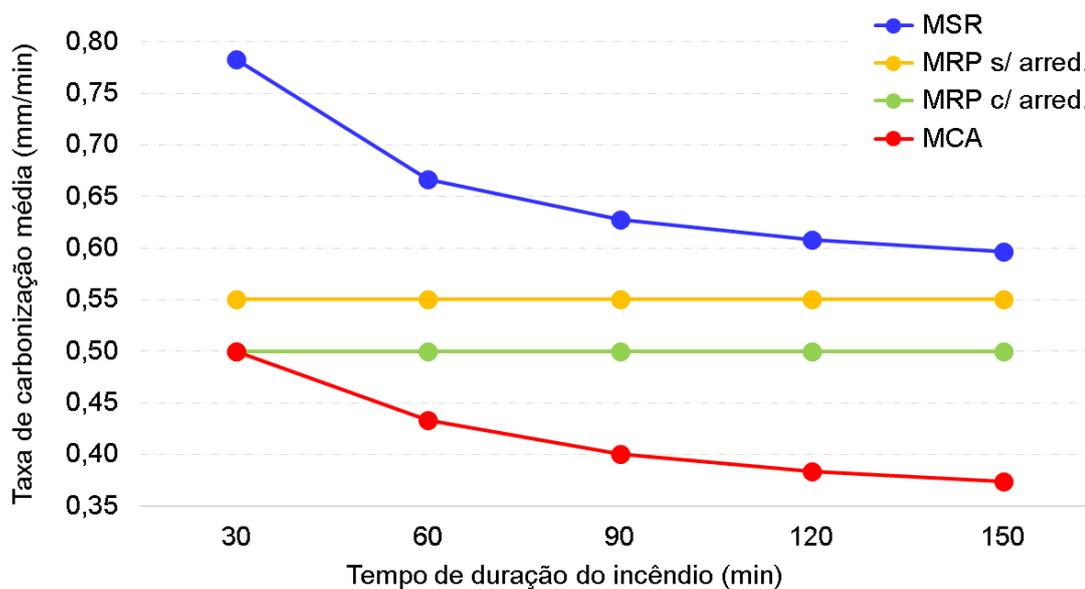


Figura 38: Taxa de carbonização média – *Eucalyptus saligna* (V#3-ES-731)Figura 39: Taxa de carbonização média – *Tabebuia serratifolia* (V#4-TS-1068)

Pôde-se notar também que apenas no método de cálculo avançado houve diferença entre as duas espécies de cada categoria, ou seja, as madeiras coníferas (*Pinus elliotti* e *Pinus taeda* L.) apresentaram taxa de carbonização diferentes entre si, bem como as dicotiledôneas (*Eucalyptus saligna* e *Tabebuia serratifolia*) tiveram resultados distintos entre elas.

Em relação à profundidade de carbonização, notou-se que uma simplificação maior tende a apresentar resultados mais conservadores, ou seja, a seção residual

efetiva é maior para os métodos mais sofisticados/realistas. O método de verificação por seção reduzida apresentou valores maiores de profundidade de carbonização, enquanto o método da redução de propriedades teve valores finais intermediários e o método avançado de cálculo, menores. A exceção ocorreu para a espécie de *Eucalyptus saligna* nos tempos de incêndio de 30 e 60 min, nos quais o método de cálculo avançado apresentou maior taxa de carbonização em relação ao método de redução de propriedades considerando o efeito de arredondamento dos cantos, tendo assim menor seção residual.

A resistência relativa das vigas à flexão seguiu a tendência de ser maior para as vigas de madeira mais densa. Assim como ocorreu na taxa de carbonização, o método de cálculo avançado foi o único que resultou em valores diferentes de resistência para madeiras do mesmo grupo – coníferas e dicotiledôneas. Foi observado maior diminuição da resistência à flexão para o método da seção reduzida, seguido pelo método da redução de propriedades sem o efeito de arredondamento dos cantos, método da redução de propriedades com o efeito de arredondamento dos cantos e, por último, sendo menos impactado, o método de cálculo avançado, como pode ser observado nas Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Figura 40: Resistência relativa à flexão – *Pinus elliotti* (V#1-PE-560)

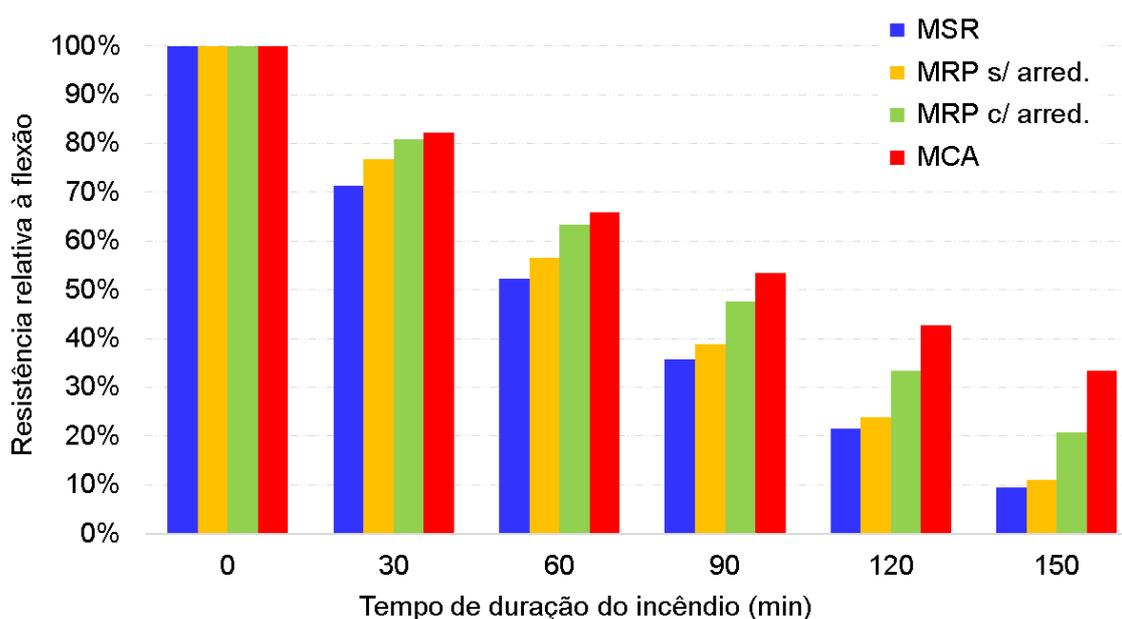


Figura 41: Resistência relativa à flexão – *Pinus taeda* L. (V#2-PT-645)

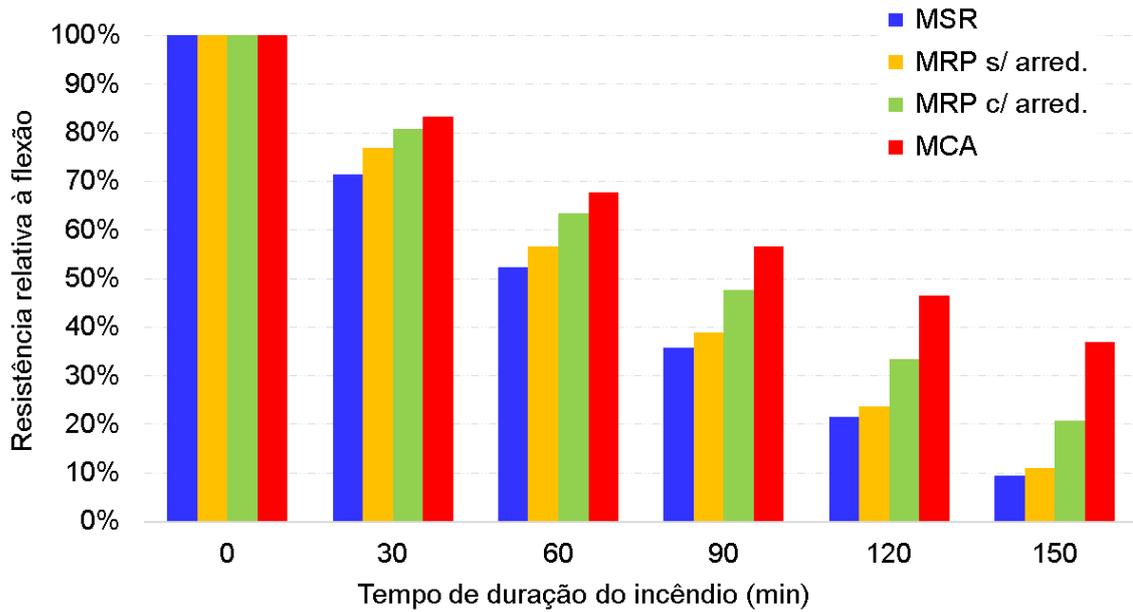


Figura 42: Resistência relativa à flexão – *Eucalyptus saligna* (V#3-ES-731)

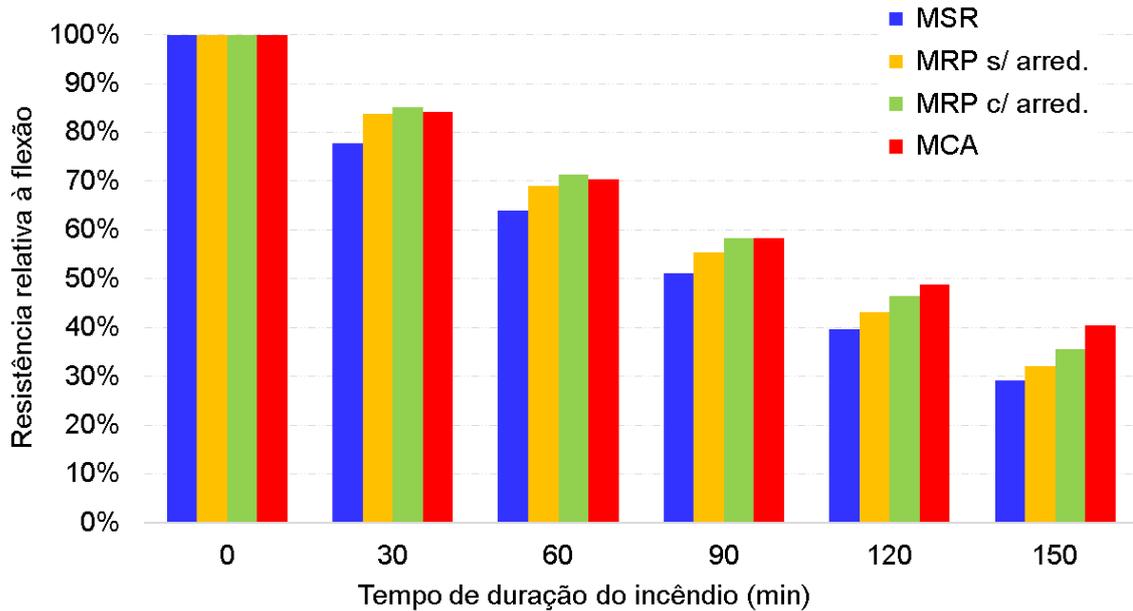
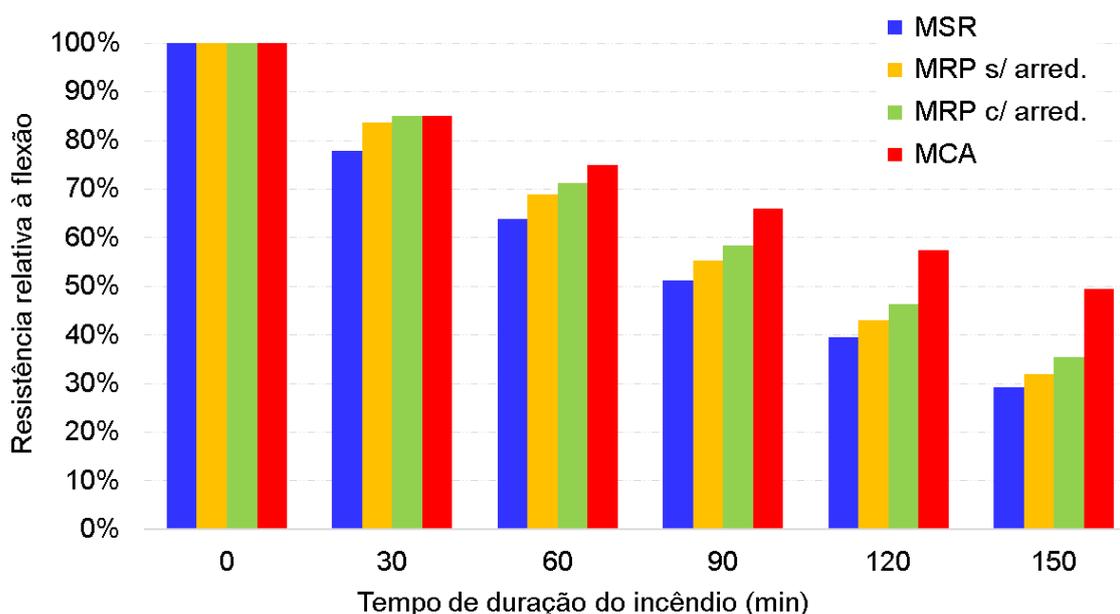


Figura 43: Resistência relativa à flexão – *Tabebuia serratifolia* (V#4-TS-1068)

Como a resistência da madeira à flexão durante o incêndio está diretamente atrelada à taxa de carbonização, notou-se que a viga de *Eucalyptus saligna* também apresentou resultados inferiores para o método de cálculo avançado nos tempos de 30 e 60 min, quando comparado ao método de redução das propriedades com efeito de arredondamento dos cantos. Nos tempos de 90 min para a viga de *Eucalyptus saligna* e de 30 min para a viga de *Tabebuia serratifolia*, foi constatada igualdade de resistência à flexão nesses dois métodos.

O método de cálculo avançado mostrou que a densidade da madeira tem influência significativa na resistência relativa à flexão das vigas expostas ao incêndio. Entre as madeiras de espécies coníferas, a com maior densidade (*Pinus taeda* L. – 645 kg/m³) apresentou resistência 10,41% maior do que a outra (*Pinus elliotti* – 560 kg/m³) no tempo de incêndio de 150 min. Entre as dicotiledôneas, esse valor foi 22,36% maior para a madeira de *Tabebuia serratifolia* (1.068 kg/m³), quando comparada à de *Eucalyptus saligna* (731 kg/m³), também no tempo de 150 min. Nos tempos menores de incêndio, a diferença foi menor.

Quando comparados os diferentes métodos para cada espécie de madeira, foi possível verificar que o método de cálculo avançado apresentou resultados com melhor desempenho das vigas em condições de incêndio. Para o tempo de exposição ao fogo de 150 min na viga de *Pinus elliotti*, por exemplo, o MCA teve resistência relativa à flexão 60,43% maior que o MRP com efeito de arredondamento

dos cantos; 203,89% maior que o MRP sem efeito de arredondamento; 250,51% maior que o MSR. Esses resultados mostram que, para vigas expostas a maiores tempos de incêndio, a utilização de métodos mais complexos de cálculo pode apresentar diferenças expressivas. Para vigas expostas a 30 min de incêndio, as diferenças caem, respectivamente, para 1,75%, 7,06% e 15,35%.

Para as outras espécies, essas mesmas diferenças entre o MCA e os outros métodos a 150 min de exposição ao incêndio foram as seguintes:

- *Pinus taeda* L.:
 - + 77,14% em relação ao MRP com arredondamento;
 - + 235,53% em relação ao MRP sem arredondamento;
 - + 287,01% em relação ao MSR;
- *Eucalyptus saligna*:
 - + 14,07% em relação ao MRP com arredondamento;
 - + 26,43% em relação ao MRP sem arredondamento;
 - + 38,59% em relação ao MSR;
- *Tabebuia serratifolia*:
 - + 39,57% em relação ao MRP com arredondamento;
 - + 54,70% em relação ao MRP sem arredondamento;
 - + 69,58% em relação ao MSR.

Como no caso da taxa de carbonização, as exceções foram apresentadas pelas vigas de *Eucalyptus saligna* nos tempos de 30 min e 60 min, sendo os resultados do MCA, respectivamente, 1,12% e 1,25% menores, quando comparados ao MRP com efeito de arredondamento dos cantos. Contudo, essa diferença não se mostra tão significativa quanto as encontradas em tempos maiores de incêndio.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÃO PARA TAXA DE CARBONIZAÇÃO

Durante as análises do método de cálculo avançado que o *Eurocode 5* apresenta para verificação da resistência de vigas de madeira ao incêndio, foi constatada que a taxa de carbonização varia de acordo com a densidade da madeira e que, nos instantes iniciais, a taxa de carbonização instantânea é mais elevada, fazendo com que a taxa de carbonização média seja decrescente conforme o tempo de duração do incêndio aumenta.

Foram comparados os resultados obtidos com o método de cálculo avançado nesse estudo com os resultados das normas australiana AS1720.4 (AS, 2018) e estadunidense NDS (AWC, 2017). Como a norma estadunidense leva como variável apenas o tempo de exposição do elemento de madeira ao incêndio, há apenas uma curva que a representa. A norma australiana, por sua vez, resulta em retas de valor constante devido a sua única variável ser a densidade da madeira, que é diferente para cada espécie analisada nesse estudo. A Figura 44 e a Figura 45 mostram essas comparações.

Figura 44: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio – comparação entre norma estadunidense NDS (AWC, 2017) e MCA do *Eurocode 5*

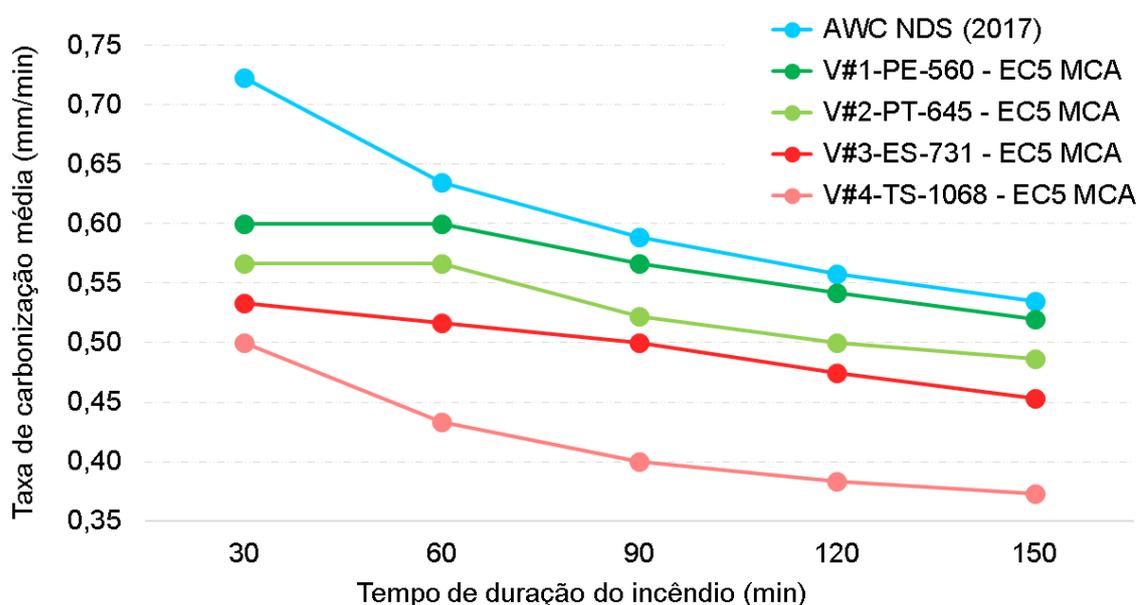
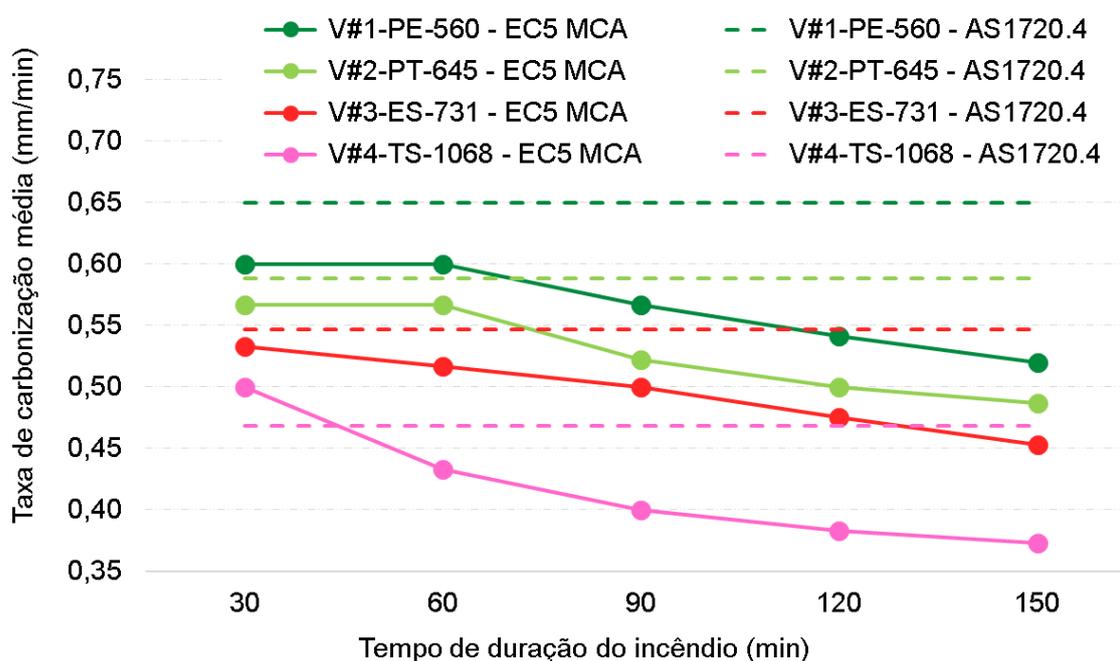


Figura 45: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio – comparação entre norma australiana AS1720.4 (AS, 2018) e MCA do *Eurocode 5*



Nota-se que a curva obtida através da equação da norma estadunidense NDS (AWC, 2017) tem um comportamento parecido com as curvas obtidas através do método de cálculo avançado, sugerindo que o comportamento adotado por ela em relação ao tempo de incêndio é condizente com o adotado pelo *Eurocode 5*. O fato de a linha estar posicionada acima das outras evidencia maior conservadorismo da norma americana em relação aos resultados do MCA do *Eurocode 5* para as madeiras analisadas nesse estudo.

A forma que a norma australiana AS1720.4 (AS, 2018) determina a taxa de carbonização, por sua vez, resulta em uma taxa de carbonização média constante ao longo do tempo de duração de incêndio, estando as linhas posicionadas acima das curvas que representam os resultados dos cálculos numéricos – com exceção das curvas equivalentes à madeira da espécie *Tabebuia serratifolia*, que, até aproximadamente 45 min, apresenta taxa de carbonização menor para os valores oriundos da norma. O afastamento entre as linhas dos resultados dessa norma é parecido ao afastamento entre as linhas dos resultados dos cálculos numéricos, sugerindo que a relação entre densidade e taxa de carbonização adotada pela norma australiana seja similar à relação do MCA do *Eurocode 5*. A norma australiana, todavia, se mostra mais conservadora para maiores tempos de incêndio.

Partindo da premissa de que ambos os métodos apresentam relações congruentes com os parâmetros que o *Eurocode 5* adota, buscou-se unir as determinações em uma mesma equação, a fim de ter as variáveis de tempo de exposição e densidade em um mesmo cálculo. Para isso, primeiro, a equação da norma estadunidense foi adaptada: obtém-se a taxa de carbonização média dividindo-se a profundidade de carbonização pelo tempo de duração de incêndio decorrido, portanto:

$$d_{char} = \beta \times t^{0,813}$$

$$\beta_{méd} = \frac{d_{char}}{t} = \frac{\beta \times t^{0,813}}{t}$$

Como o tempo é informado em horas, altera-se a equação para que ele seja dado em minutos.

$$\beta_{méd} = \frac{\beta \times \left(\frac{t}{60}\right)^{0,813}}{\left(\frac{t}{60}\right)} = \frac{60^{0,187} \times \beta}{t^{0,187}}$$

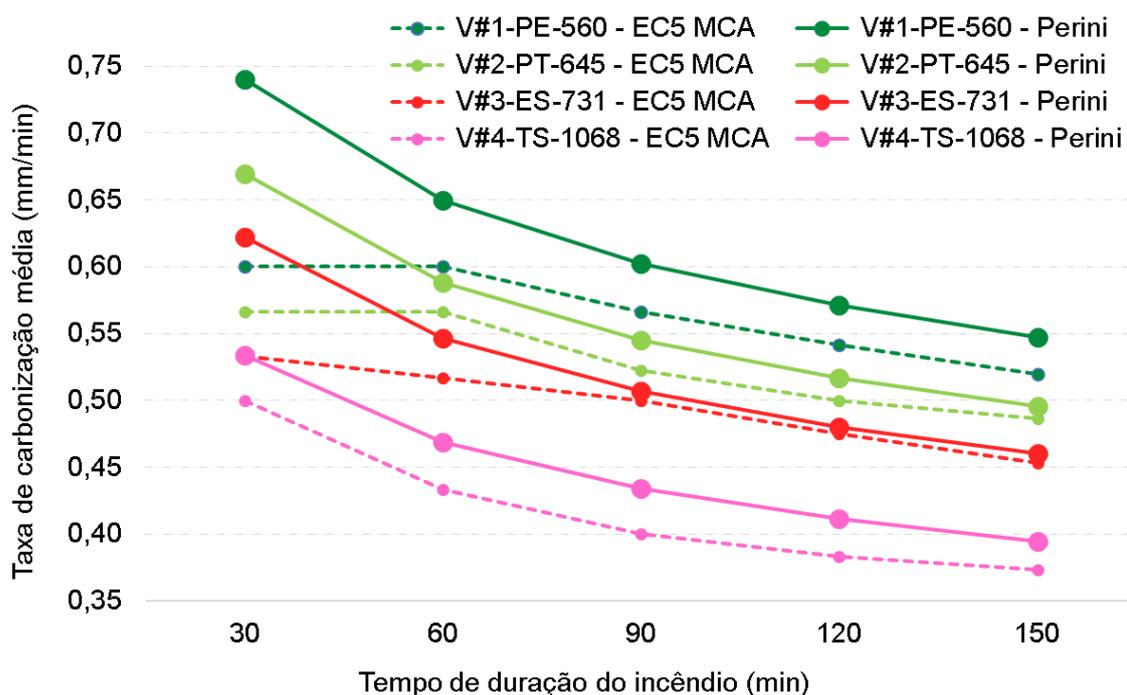
A nova equação precisou apresentar um termo baseado na densidade e, para isso, foi utilizada a equação da norma australiana AS1720.4 (AS, 2018).

$$\beta_{méd} = \frac{60^{0,187} \times \beta}{t^{0,187}} \quad \text{e} \quad \beta = 0,4 + \left(\frac{280}{\rho_{12}}\right)^2 \quad \therefore$$

$$\beta_{méd} = \frac{60^{0,187} \times \left[0,4 + \left(\frac{280}{\rho_{12}}\right)^2\right]}{t^{0,187}}$$

Com essa equação definida e contando como variáveis tempo e densidade, foram definidas as curvas para cada uma das espécies analisadas e comparados os resultados desses com os resultados dos cálculos numéricos. O gráfico da Figura 46 ilustra essa comparação (os resultados da nova equação estão identificados como “Perini”).

Figura 46: Taxa de carbonização média ao longo do incêndio



Foi possível verificar uma maior aproximação às curvas obtidas no método numérico em relação às taxas de carbonização fornecidas nas normas EN 1995-1-2 (2004) – métodos simplificados –, NDS (AWC, 2017) e AS1720.4 (AS, 2018). Em termos de resultados, utilizando-se do método de redução de propriedades que considera o arredondamento dos cantos, ao adotar a taxa de carbonização média baseada na equação proposta pelo Autor, tem-se os valores apresentados na Tabela 24, na Tabela 25 e na Tabela 26 (o Apêndice C apresenta o desenvolvimento dos cálculos).

Tabela 24: Resistência à flexão nos tempos de incêndio t , de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor

Espécie	Resistência à flexão (kN.cm)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
<i>Pinus elliotti</i>	54.614,5	44.187,8	35.473,9	27.937,6	21.323,4
<i>Pinus taeda L.</i>	61.521,2	51.001,4	42.129,1	34.380	27.508,7
<i>Eucalyptus saligna</i>	65.927	55.528,2	46.705,2	38.949,9	32.026,4
<i>Tabebuia serratifolia</i>	110.369,7	95.640,2	83.007,2	71.776,8	61.629,6

Tabela 25: Perda de resistência à flexão nos tempos de incêndio t , relativa ao instante inicial de incêndio, de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor

Espécie	Perda de resistência à flexão em relação ao instante inicial				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
<i>Pinus elliotti</i>	-21,6%	-36,6%	-49,1%	-59,9%	-69,4%
<i>Pinus taeda L.</i>	-19,7%	-33,4%	-45%	-55,1%	-64,1%
<i>Eucalyptus saligna</i>	-18,3%	-31,2%	-42,1%	-51,8%	-60,3%
<i>Tabebuia serratifolia</i>	-15,8%	-27%	-36,7%	-45,3%	-53%

Tabela 26: Taxa de carbonização média para os tempos t de incêndio, de acordo com adaptação entre o método de redução de propriedades e a equação proposta pelo Autor

Espécie	Taxa de carbonização média (mm/min)				
	$t = 30$ min	$t = 60$ min	$t = 90$ min	$t = 120$ min	$t = 150$ min
<i>Pinus elliotti</i>	0,74	0,65	0,60	0,57	0,55
<i>Pinus taeda L.</i>	0,67	0,59	0,55	0,52	0,50
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,62	0,55	0,51	0,48	0,46
<i>Tabebuia serratifolia</i>	0,53	0,47	0,43	0,41	0,39

A equação proposta apresentou resultados de taxa de carbonização média mais próximos aos resultados do cálculo numérico, sendo a maior diferença de 23,33% para a madeira de *Pinus elliotti* no tempo de incêndio de 30 min. Excluindo-se o tempo de 30 min, que, nas análises numéricas, apresentou alguns resultados inconformes com o padrão de evolução da curva, a maior diferença foi de 8,63%, para a madeira de *Tabebuia serratifolia* no tempo de incêndio de 90 min.

Em relação à resistência à flexão das vigas, a maior diferença entre o método com a equação proposta e o método de cálculo avançado foi de 8,39%, sendo identificada na madeira de *Pinus elliotti* no tempo de incêndio de 150 min. Por existir diferença entre as taxas de carbonização médias do método de cálculo avançado e do método baseado na equação proposta, a diferença das resistências entre os métodos tende a ser proporcionalmente maior conforme cresce o tempo de duração de incêndio.

A Figura 47, a Figura 48, a Figura 49 e a Figura 50 apresentam, para cada espécie de madeira, as resistências à flexão relativas, em função do tempo, oriundos do método que usa a equação proposta pelo Autor, ao lado dos resultados já apresentados anteriormente, a fim de comparação.

Figura 47: Resistência à flexão relativa – *Pinus elliotti* (V#1-PE-560)

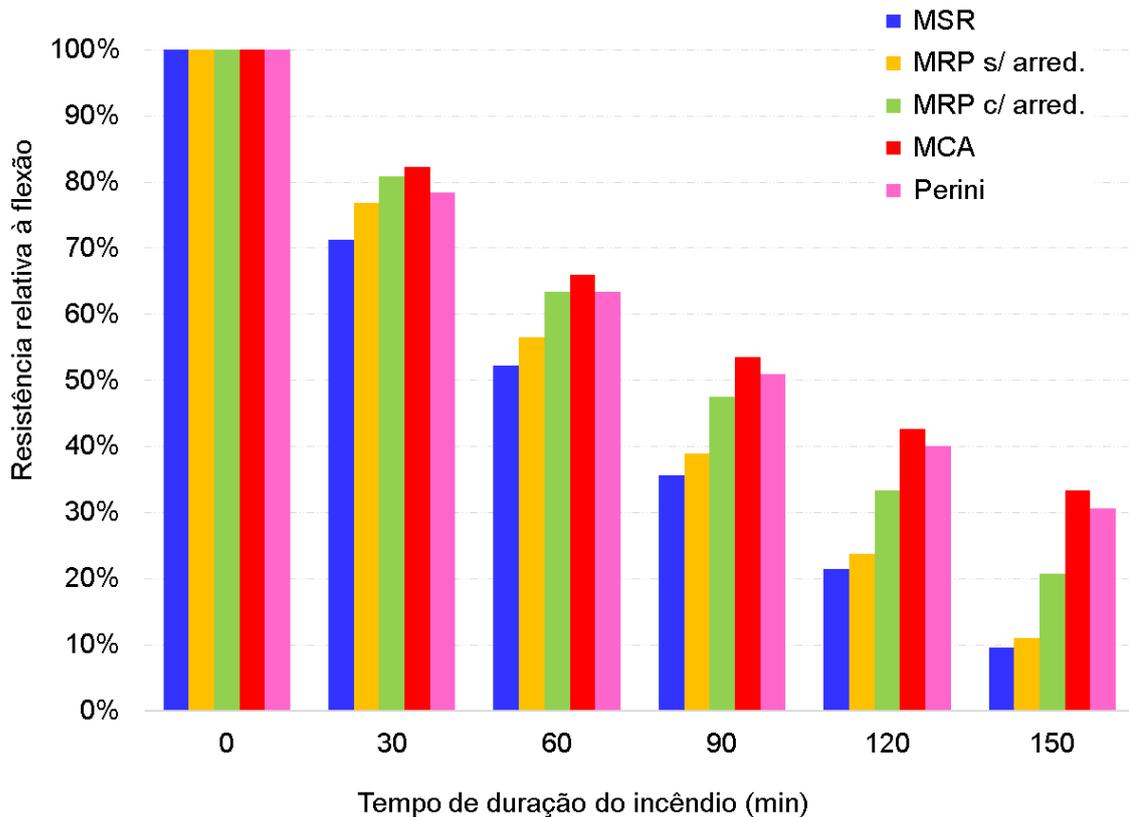


Figura 48: Resistência à flexão relativa – *Pinus taeda* L. (V#2-PT-645)

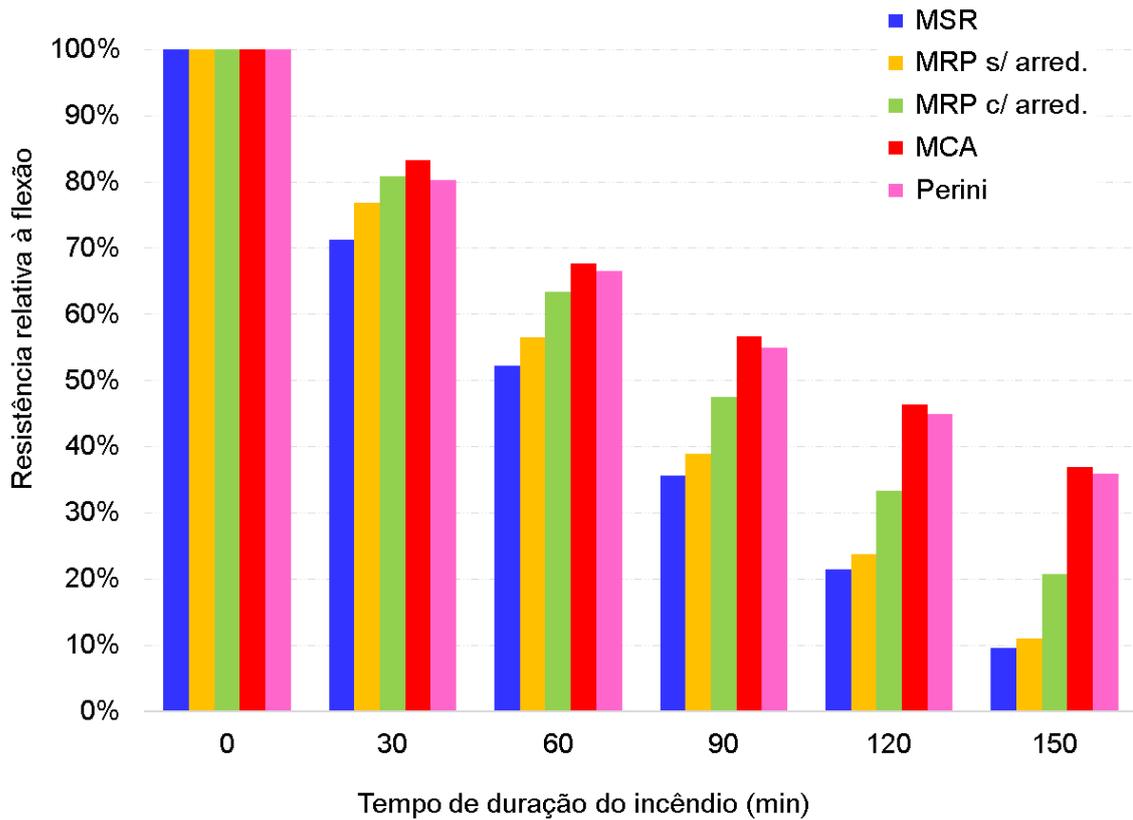


Figura 49: Resistência à flexão relativa – *Eucalyptus saligna* (V#3-ES-731)

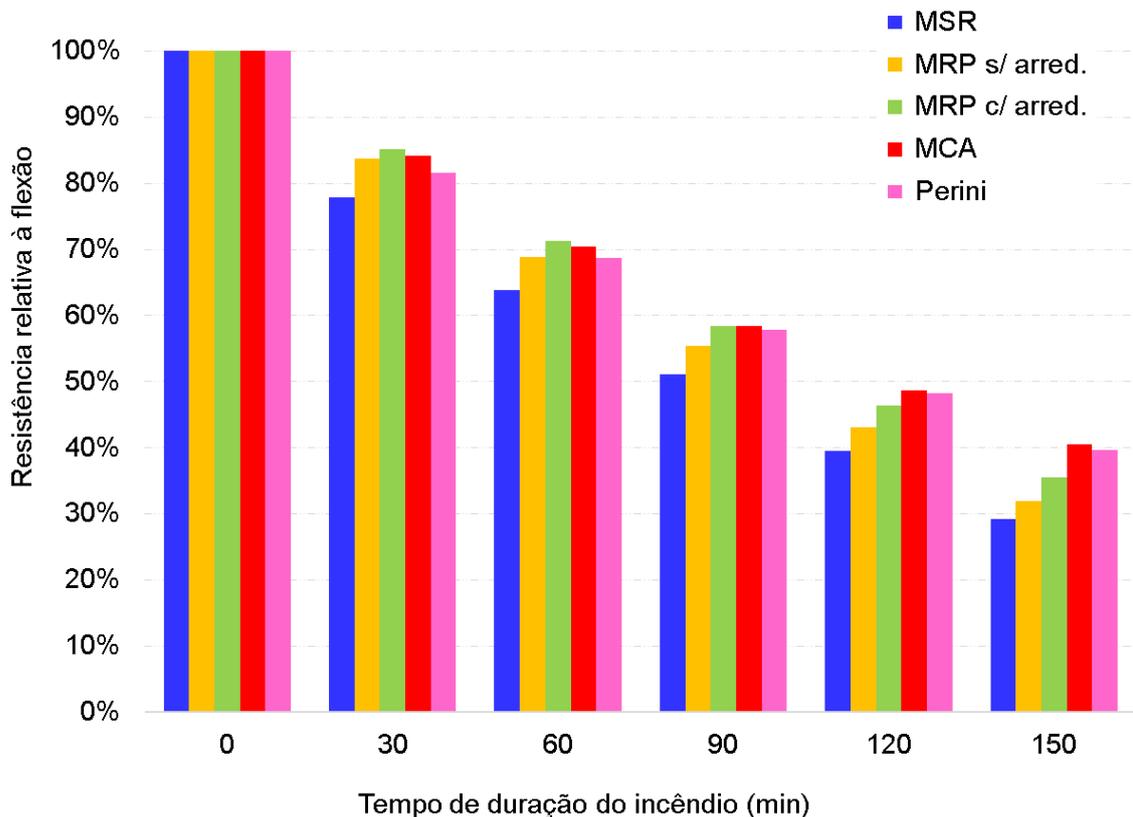
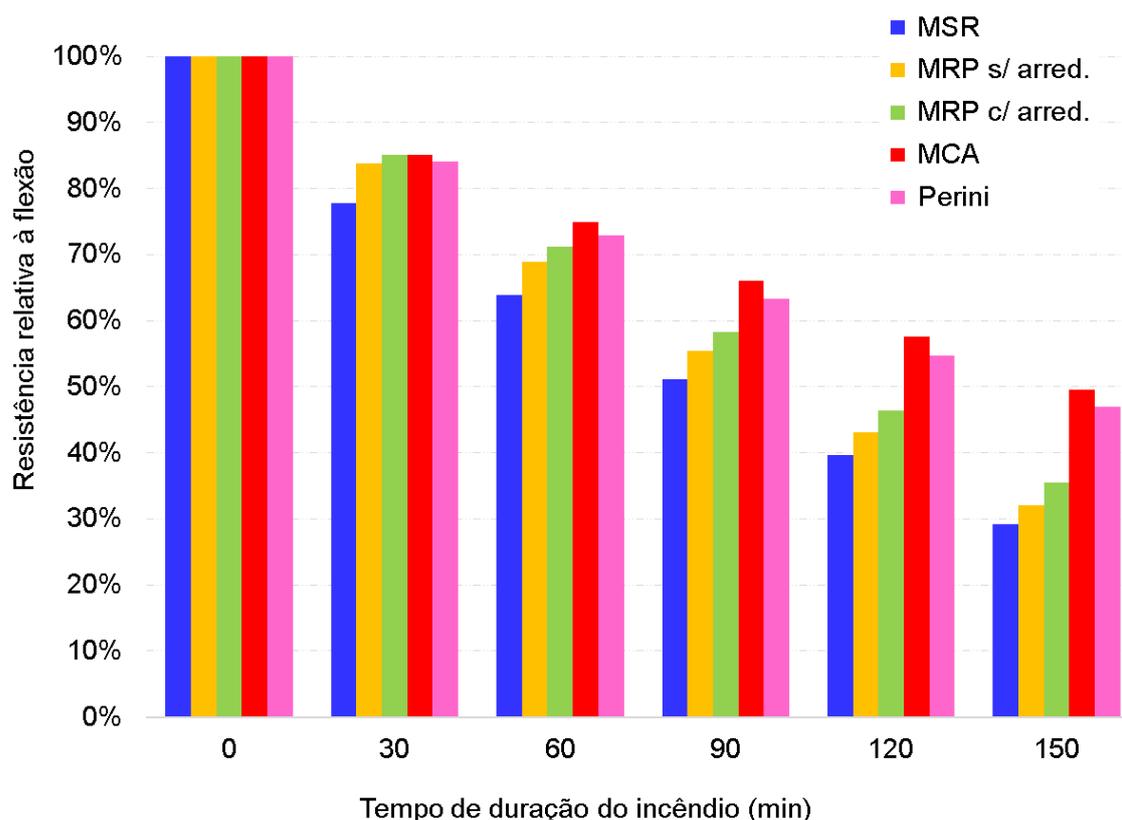


Figura 50: Resistência à flexão relativa – *Tabebuia serratifolia* (V#4-TS-1068)

Os resultados do método com a nova equação proposta se mostraram muito próximos ao método de cálculo avançado orientado pelo *Eurocode 5*, com diferenças, na maioria das vezes, menos expressivas do que aquelas que se apresentam quando comparado o método de cálculo avançado com os métodos simplificados, principalmente em tempos maiores de exposição da viga de madeira ao incêndio.

É possível verificar que, para tempos menores de incêndio, o método que adota a equação proposta apresentou, por vezes, resultados mais conservadores do que os do método da redução de propriedades que considera o efeito de arredondamento dos cantos. Isso não se apresenta como uma deficiência da nova equação, visto que a diferença máxima encontrada nos tempos de incêndio de até 60 min foi de 4,1% entre esses dois métodos, sendo pouco significativa.

A equação proposta pelo Autor demonstrou, para os quatro casos analisados nesse estudo, ser uma alternativa simplificada com resultados mais próximos aos resultados do método de cálculo avançado proposto pelo *Eurocode 5*, poupando assim esforço computacional e atingindo resultados mais econômicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados das taxas de carbonização oriundos de análise de cálculos numéricos, observou-se que elas têm relação inversa com as densidades das madeiras. Essa observação vai de encontro ao constatado por outros autores em análises experimentais (NIANKOUO et al, 2004; WEN et al, 2015; ADETAYO e DAHUNSI, 2018) e numéricas (CACHIM e FRANSSEN, 2009), além da forma que a norma australiana AS1720.4 (AS, 2018) aborda a taxa de carbonização. A consequência da menor taxa de carbonização é a menor perda de resistência à flexão da madeira em situação de incêndio, sendo a maior densidade uma característica positiva.

Outra importante relação constatada foi entre a taxa de carbonização média e o tempo de incêndio decorrido: quanto maior o tempo de incêndio, menor a taxa. Essa forma de abordagem está presente na norma estadunidense NDS (AWC, 2017) e reflete a maior condutividade térmica da madeira em relação ao carvão.

A análise que adaptou a equação desenvolvida nesse documento ao método da redução de propriedades apresentou resultados de resistência à flexão e de taxa de carbonização mais próximos aos resultados numéricos do que os métodos simplificados, mostrando maior precisão em relação ao comportamento real da decomposição térmica da madeira. A maior diferença na resistência à flexão entre o MCA e o MRP com a nova equação foi de 8,63% para a viga V#1-PE-560 a 150 min de incêndio. Esse valor foi menor do que os constatados entre os outros métodos simplificados e o MCA para essa viga nesse mesmo tempo de incêndio: redução de propriedades com arredondamento dos cantos (37,67%), redução de propriedades sem arredondamento dos cantos (67,09%) e seção reduzida (71,47%).

Com a facilidade encontrada atualmente em resolver expressões matemáticas complexas, a diferença no esforço de cálculo entre os métodos simplificados é praticamente nula, não justificando a adoção de parâmetros tão conservadores como os adotados no método da seção reduzida. Isso faz com que a equação proposta pelo Autor seja facilmente inserida em casos de verificação de resistência ao incêndio de peças estruturais de madeira, visto que é feito o acréscimo de apenas duas variáveis na determinação da profundidade de carbonização e os resultados são satisfatórios em comparação aos métodos simplificados propostos pelo *Eurocode 5*. Os cálculos avançados, por sua vez, parecem ser mais

apropriados para tempos de incêndio maiores dos que os analisados nesse estudo, dada a tendência de aumento na diferença entre os métodos ao longo do tempo, e em peças de maiores dimensões, visto que as seções residuais das vigas analisadas perdem grande parte de sua seção dentro do tempo de incêndio de 150 min.

Ressalta-se, porém, que, apesar de a análise numérica contar com variação de parâmetros físicos em relação à temperatura de forma consolidada pela literatura, a consideração das propriedades mecânicas é feita através da adaptação de um modelo simplificado proposto pela norma EN 1995-1-2 (2004). Para resultados mais precisos e confiáveis, dever-se-ia analisar as propriedades mecânicas em cada ponto da seção residual da viga. A variação das propriedades mecânicas da madeira com o aumento da temperatura, todavia, não é consenso entre a literatura abordada, necessitando que, antes de tal análise, se realizasse um aprofundamento no tema e se apresentasse resultados confiáveis e convergentes.

REFERÊNCIAS

- ADETAYO, Oluwaseun A.; DAHUNSI, Bamidele I. O. Comparison of experimental charring rate of some selected constructional wood species from South-Western Nigeria with selected charring models. **Arid zone Journal of Engineering, Technology and Environment**, v. 15, n. 1, p. 25-39, mar. 2019.
- ADETAYO, Oluwaseun A.; DAHUNSI, Bamidele I. O. Development of models for charring rate of selected construction timber species in South-Western Nigeria. **FUOYE Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 1, p. 17-21, mar. 2018.
- AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **National Design Specification – NDS**: for wood construction: 2018 Edition. Leesburg (EUA), 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS (AGEFLOR). **O setor de base florestal no Rio Grande do Sul 2020**: ano base 2019. Porto Alegre: AGEFLOR, 2020.
- AUMENTO persistente no custo da construção é principal marca de 2021, diz CBIC. *In*: AGÊNCIA CBIC. Brasília, 13 dez. 2021. Disponível em: <https://cbic.org.br/aumento-persistente-no-custo-da-construcao-e-principal-marca-de-2021-diz-cbic/>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- AUSTRALIAN STANDARDIZATION/NEW ZEALANDER STANDARDIZATION (AS/NZS). **AS 1720.4**: Timber structures – fire resistance for structural adequacy of timber members. Austrália, 2018.
- BOSCHETTI, Walter T. N. et al. Properties of charcoal produced from reaction wood in trees inclined due to wind. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6. 2017.
- CACHIM, P. B.; FRANSSSEN, J.-M.; Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. **Fire and Materials**. n. 33, p. 129-143. 2008.
- CAETANO, Rodrigo. Essa *startup* vai construir prédios de madeira na Vila Madalena, em SP. *In*: EXAME. São Paulo, 14 fev. 2021. Disponível em: <https://exame.com/esg/essa-startup-vai-construir-predios-de-madeira-na-vila-madalena-em-sp/>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1. ed. Barueri: Manole, 2003.

CARRASCO, Edgar V. M.; OLIVEIRA, Ana L. C.; MANTILLA, Judy N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 389-400, abr.-jun. 2016.

CONSTRUÇÃO civil, em 2021, registrou o seu maior crescimento nos últimos 10 anos. *In*: AGÊNCIA CBIC. Brasília, 11 fev. 2022. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-em-2021-registrou-o-seu-maior-crescimento-nos-ultimos-10-anos/>. Acesso em: 22 abr. 2022.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da densidade do carvão vegetal por atenuação da radiação gama. **IPEF**, n. 39, p. 17-20, ago. 1988.

DIRETOR da CSN: preços do aço subirão 20% em abril após fim dos descontos. *In*: UOL Economia. São Paulo, 16 mar. 2022. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2022/03/16/diretor-da-csn-precos-do-aco-subirao-20-em-abril-apos-fim-dos-descontos.htm>. Acesso em: 22 abr. 2022.

DELIISKI, Nencho. Transient heat conduction in capillary porous bodies. **Convection and Conduction Heat Transfer**. 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2: Design of timber structures**: Part 1-2: General structural fire design. Bruxelas (Bélgica), 2004.

FAHRNI, R. et al. Fire tests on glue-laminated timber beams with specific local material properties. **Fire Safety Journal**. p. 1-9. 2017.

FIGUEROA, Manuel J. M. **Coefficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

FIGUEROA, Manuel J. M. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do Paricá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FIGUEROA, Manuel J. M.; MORAES, Poliana D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out.-dez. 2009.

FIGUEROA, Manuel J. M.; MORAES, Poliana D. Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá. **Construction and Building Materials**, n. 24, p. 99-104. 2010.

FONSECA, E. M. M.; SILVA, L.; LEITE, P. A. S. Numerical model to predict the effect of wood density in wood-steel-wood connections with and without passive protection under fire. **Journal of Fire Sciences**. v. 38, n. 2, p. 122-135. 2020.

FRANGI, A.; FONTANA, M. Charring rates and temperature profiles of wood sections. **Fire and Materials**. n. 27, p. 91-102. 2003.

FRIQUIN, Kathinka L. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. **Fire and Material**, n. 35, p. 303-327. 2011.

FRÜHWALD, Arno. Comparison of wood products and major substitutes with respect to environmental and energy balances. *In*: SEMINAR ON STRATEGIES FOR THE SOUND USE OF WOOD, 2003, Poiana Brasov (Romênia). **Anais [...]**. Poiana Brasov: Economic Commission for Europe/Food and Agriculture Organization, 2003.

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, n. 1, p. 4-36, jan. 1982.

GERNAY, T.; FRANSSEN J. M. A performance indicator for structures under natural fire. **Engineering Structures**, v. 100, p. 94-103. 2015.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Gen Tech Rep FPL-GTR-190. US Department of Agriculture, Madison (EUA), 2010.

HARMATHY, T. Z.; SULTAN, M.; MacLaurin, J. W. Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 fire resistance tests. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 15, n. 6, p. 371-375, nov. 1987.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual: 2020**. São Paulo: IBÁ, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834: Fire-Resistance Tests** – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. Genebra (Suíça): ISO/TC, 1990.

JANNENE, Jeramey. Inside the world's tallest mass timber building. *In*: URBAN Milwaukee. Milwaukee, 07 jul. 2021. Disponível em: <https://urbanmilwaukee.com/2021/07/07/eyes-on-milwaukee-inside-the-worlds-tallest-mass-timber-building/>. Acesso em: 27 mai. 2022.

JIANG, Jinghui et al. Compression strength and modulus of elasticity parallel to the grain of oak wood at ultra-low and high temperatures. **BioResources**, v. 9, n. 2, p. 3571-3579. 2014.

LECKNER, Bo; THUNMAN, Henrik. Thermal conductivity of wood: models for different stages of combustion. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, p. 47-54. 2002.

LOBÃO, Moisés S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894. 2004.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da Madeira**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

- MACLEAN, J. D. Thermal conductivity of wood. **Heating, Piping and Air Conditioning**, v. 3, n. 6, p. 380-391, jun. 1941.
- MIKKOLA, Esko. Charring of wood-based materials. **Fire Safety Science**. n. 3, p. 547-556. 1991.
- MORAES, Poliana D.; ROGAUME, Yann; TRIBOULOT, Pascal. Influence of temperature on the modulus of elasticity (MOE) of Pinus Sylvestris L. **Holzforschung**, v. 58, p. 143-147. 2004.
- MOREIRA, Renata. **Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN), Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- MORESCHI, João C. **Propriedades da Madeira**. Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná – Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 4. ed. Curitiba, 2012.
- NJANKOUO, J. M.; DOTREPPE, J. C.; FRANSSSEN, J.-M. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. **Fire and Materials**, v.28, p.15-24. 2004.
- O EDIFÍCIO mais alto de madeira do mundo e alguns outros. *In*: FLORESTAL Brasil. [S. l], 21 jun. 2021. Disponível em: <https://florestalbrasil.com/2021/06/o-edificio-de-madeira-mais-alto-do-mundo-e-alguns-outros/>. Acesso em: 27 mai. 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Acordo de Paris sobre o clima**. Brasília, 11 dez. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>. Acesso em: 27 mai. 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília, [2022?]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 27 mai. 2022.
- PEREIRA, Bárbara L. C. et al. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012. 2012.
- PERTILE, Ananda C. **Análise numérica de vigas de madeira laminada colada reforçadas em situação de incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- PINTO, Edna M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o Eucalyptus citriodora e E. grandis**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- PINTO, Edna M.; CALIL JUNIOR, Carlito. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo. **Minerva**, v. 3, n. 2, p. 131-140. 2006.

PREÇOS na indústria sobem em janeiro e guerra pode pressionar ainda mais. *In: VEJA*. São Paulo, 8 mar. 2022. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/precos-na-industria-sobem-em-janeiro-e-guerra-pode-pressionar-ainda-mais/>. Acesso em: 22 abr. 2022.

PURKISS, J. A.; LI, L.-Y. **Fire safety engineering design of structures**. 3. ed. CRC Press, 2013.

QUIQUERO, H.; GALES, J.; ABU, A. Finite element modelling of post-tensioned timber beams at ambient and fire conditions. **Fire Technology**. 2019.

RADMANOVIC, Kristijan; DUKIC, Igor; PERVAN, Stjepan. Specific heat capacity of wood. **Drvna Industrija**, [S.], v. 65, n. 2, p. 151-157. 2014.

RAO, Singiresu S. **The finite element method in engineering**. Butterworth-Heinemann, 2013.

ROCHA, Monique A. de F. **Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, Ivanildo da S. dos. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SANTOS, Rosimeire C. dos et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.

SARAIVA, Alessandra. Inflação de porta de fábrica avança 28,39% em 2021, maior alta da série histórica. *In: VALOR*. São Paulo, 1º fev. 2022. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2022/02/01/inflacao-de-porta-de-fabrica-avanca-2839percent-em-2021-maior-alta-da-serie-historica.ghtml>. Acesso em: 22 abr. 2022.

SHIGUE, Erich Kazuo. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SHIMOYAMA, Vanilda R. de S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em Eucalyptus spp.** 1990. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SILVA, Marcio R. da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus taeda**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SIMPSON, W.; TENWOLDE, A. Physical properties and moisture relations of wood. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Gen Tech Rep FPL-GTR-113. US Department of Agriculture, Madison (EUA), 1999.

SULEIMAN, B. M. et al. Thermal conductivity and diffusivity of wood. **Wood Science and Technology**. n. 33, p. 465-473. 1999.

SULZBERGER, P. H. **The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints**. 1953.

THI, V. D. et al. Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire. **Engineering Structures**, n. 143, p. 11-21. 2017.

THI, V. D. et al. Finite element modelling of the pyrolysis of wet wood subjected to fire. **Fire Safety Journal**, n. 81, p. 85-96. 2016

TOPPINEN, Anne et al. The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy: a Delphi study from Finland and Sweden. **Journal of Forest Economics**, n. 31, p. 3-10. 2018.

VALVERDE, Michelle. Aço será reajustado em torno de 20% no próximo mês. *In*: DIÁRIO do Comércio. [Belo Horizonte?]. 23 mar. 2022. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/aco-sera-reajustado-em-torno-de-20-no-proximo-mes/>. Acesso em: 22 abr. 2022.

VIDAURRE, Graziela et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**. n. 18, p. 469-480. 2011.

WEN, L.; HAN, L.; ZHOU, H. Factors influencing the charring rate of Chinese wood by using the cone calorimeter. **BioResources**. v. 10, n. 4, p. 7263-7272. 2015.

YOUNG, S. A.; CLANCY, P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions. **Fire and Materials**, n. 25, p. 83-93. 2001.

APÊNDICE A – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS À FLEXÃO NO INSTANTE INICIAL DE INCÊNDIO

Nesse apêndice, apresentam-se os cálculos de resistência da viga de *Pinus elliotti* à flexão no instante inicial de incêndio, considerando-se o tempo t igual a 0 min. Não se faz necessário apresentar o desenvolvimento matemático das vigas de outras espécies, dada a repetição das equações.

A.1 – MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR)

Para o instante inicial de incêndio, o MSR determina 0 mm de profundidade de carbonização, acrescida de 0 mm ($t/20$) em decorrência do tempo. Isso quer dizer que deve ser considerada a seção sem degradação, sendo a verificação, portanto, com a seção completa.

Com a seção de largura b de 30 cm e altura h de 60 cm, retangular com cantos em ângulo reto, e, por isso, tendo a linha neutra exatamente à meia altura, tem-se o módulo de resistência elástico de compressão (W_c) igual ao de tração (W_t).

$$W_c = W_t = \frac{b \times h^2}{6}$$

$$W_c = W_t = \frac{30 \times 60^2}{6} = 18.000 \text{ cm}^3 = 0,018 \text{ m}^3$$

O momento fletor resistente na parte comprimida da seção (M_{rc}) é dado por:

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c$$

Com os valores de f_{c0} da Tabela 9, é possível calcular o valor de M_{rc} para cada viga. No caso da viga de *Pinus elliotti*, o resultado é

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,018 = 727,2 \text{ kN.m}$$

O momento fletor resistente na parte tracionada da seção (M_{rt}) é dado por:

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t$$

Com os valores de f_{t0} da Tabela 9 (capítulo 3), é possível calcular o valor de M_{rt} para cada viga. No caso da viga de *Pinus elliotti*, o resultado é o que segue:

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,018 = 1.188 \text{ kN.m}$$

A.2 – MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP)

O MRP tem como base de verificação a relação entre perímetro e área, que influencia no valor de $k_{\text{mod,fi}}$. No tempo de incêndio de 0 min, tem-se a área A de 0,18 m² e o perímetro P de 1,5 m. $k_{\text{mod,fi}}$ para flexão é dado por:

$$k_{\text{mod,fi}} = 1 - \frac{P}{(200 \times A)} = 1 - \frac{1,5}{(200 \times 0,18)} = 0,95833$$

Com a seção se mantendo igual à original, os valores de M_{rc} e de M_{rt} são os verificados para o MSR, sendo multiplicados por $k_{\text{mod,fi}}$, chegando aos resultados

$$M_{rc} = 0,95833 \times 727,2 = 696,9 \text{ kN.m}$$

$$M_{rt} = 0,95833 \times 1.188 = 1.138,5 \text{ kN.m}$$

Como não há arredondamento dos cantos na consideração de tempo de incêndio de 0 min, esse é o mesmo resultado para as duas variações de cálculo do método da redução de propriedades.

A.3 – MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)

Como o MCA desenvolvido nesse documento leva em consideração os resultados das isothermas obtidas no *software* Abaqus/CAE, adaptando as profundidades de carbonização ao MRP, tem-se que, para o tempo de incêndio de 0 min, os resultados de M_{rc} e M_{rt} são os mesmos obtidos em A.2.

APÊNDICE B – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS À FLEXÃO NO TEMPO DE INCÊNDIO DE 90 MIN

Nesse apêndice, apresentam-se os cálculos de resistência da viga de *Pinus elliotti* à flexão no tempo de incêndio de 90 min. Não se faz necessário apresentar o desenvolvimento matemático das vigas de outras espécies e de outros tempos de incêndio, dada a repetição das equações.

B.1 – MÉTODO DA SEÇÃO REDUZIDA (MSR)

Para o tempo de 90 min de incêndio, o MSR determina 72 mm de profundidade de carbonização ($\beta_n = 0,8$ mm/min), acrescida de 7 mm (incêndios a partir de 20 min), totalizando 79 mm de redução em cada face exposta ao incêndio.

Com a seção efetiva de largura b de 14,2 cm e altura h de 52,1 cm, retangular com cantos em ângulo reto, e, por isso, tendo a linha neutra exatamente à meia altura, tem-se o módulo de resistência elástico de compressão (W_c) igual ao de tração (W_t).

$$W_c = W_t = \frac{b \times h^2}{6}$$

$$W_c = W_t = \frac{14,2 \times 52,1^2}{6} = 6.424,1 \text{ cm}^3 = 0,0064241 \text{ m}^3$$

O momento fletor resistente na parte comprimida da seção (M_{rc}) é dado por:

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c$$

Com os valores de f_{c0} da Tabela 9, é possível calcular o valor de M_{rc} para cada viga. No caso da viga de *Pinus elliotti*, o resultado é

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,0064241 = 259,534 \text{ kN.m}$$

O momento fletor resistente na parte tracionada da seção (M_{rt}) é dado por:

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t$$

Com os valores de f_{t0} da Tabela 9 (capítulo 3), é possível calcular o valor de M_{rt} para cada viga. No caso da viga de *Pinus elliotti*, o resultado é o que segue:

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,0064241 = 423,991 \text{ kN.m}$$

B.2 – MÉTODO DA REDUÇÃO DE PROPRIEDADES (MRP)

O MRP tem como base de verificação a relação entre perímetro e área, que influencia no valor de $k_{mod,fi}$. As considerações são diferentes para a verificação que desconsidera o efeito de arredondamento dos cantos e a que o considera.

B.2.1 – MRP sem considerar efeito de arredondamento nos cantos

No tempo de incêndio de 90 min, tem-se a redução de 72 mm ($\beta_n = 0,8$ mm/min) em cada face exposta ao incêndio, resultando em seção com largura de 15,6 cm e altura de 52,8 cm. Portanto, a área A é de 0,0824 m² e o perímetro P é de 1,212 m. Os valores de M_{rc} e de M_{rt} são calculados a partir dos valores da seção residual, sendo multiplicados por $k_{mod,fi}$, resultando nos momentos resistentes de incêndio $M_{rc,fi}$ e de $M_{rt,fi}$:

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,0072484 = 292,835 \text{ kN.m}$$

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,0072484 = 478,393 \text{ kN.m}$$

$$k_{mod,fi} = 1 - \frac{P}{(200 \times A)} = 1 - \frac{1,212}{(200 \times 0,0824)} = 0,92643$$

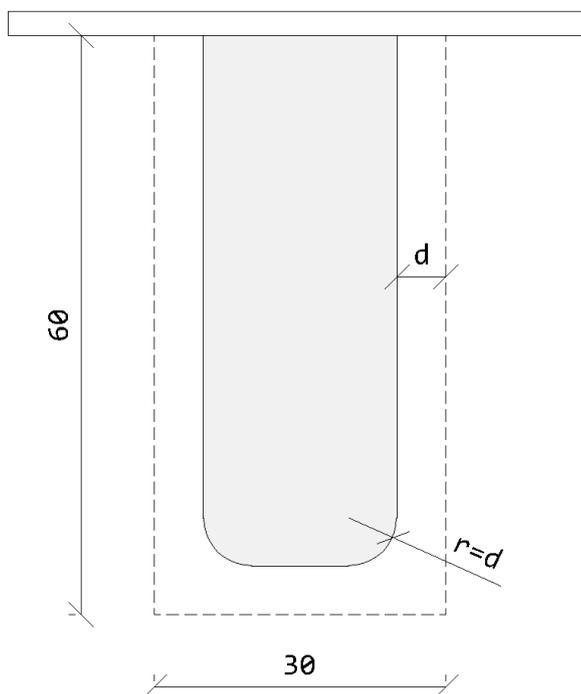
$$M_{rc,fi} = k_{mod,fi} \times M_{rc} = 0,92643 \times 292,835 = 271,29 \text{ kN.m}$$

$$M_{rt,fi} = k_{mod,fi} \times M_{rt} = 0,92643 \times 478,393 = 443,197 \text{ kN.m}$$

B.2.2 – MRP considerando efeito de arredondamento nos cantos

No tempo de incêndio de 90 min, tem-se a redução de 58,5 mm ($\beta_0 = 0,65$ mm/min) em cada face exposta ao incêndio, resultando em seção com largura de 18,3 cm e altura de 54,15 cm, com raio de 5,85 cm nos cantos de duas faces expostas. A Figura 51 ilustra a forma final considerada no método de redução de propriedades com arredondamento dos cantos.

Figura 51: Seção residual genérica com efeito de arredondamento dos cantos



Com as dimensões obtidas, tem-se que a área A é de $0,1045 \text{ m}^2$ e o perímetro P é de $1,2158 \text{ m}$. Como a seção deixa de ser simétrica em relação a qualquer eixo horizontal, os valores de W_c e de W_t passam a ser diferentes. As demais considerações seguem as mesmas do constante em C.2.1.

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,008714 = 352,045 \text{ kN.m}$$

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,008468 = 558,885 \text{ kN.m}$$

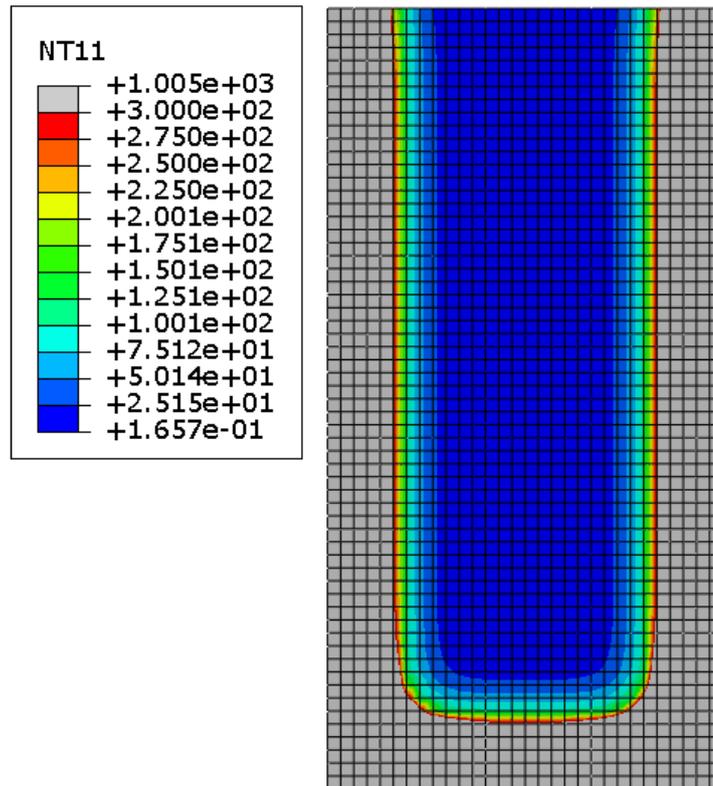
$$k_{\text{mod,fi}} = 1 - \frac{P}{(200 \times A)} = 1 - \frac{1,2158}{(200 \times 0,1045)} = 0,94181$$

$$M_{rc,fi} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{rc} = 0,94181 \times 352,045 = 331,561 \text{ kN.m}$$

$$M_{rt,fi} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{rt} = 0,94181 \times 558,885 = 526,365 \text{ kN.m}$$

B.3 – MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO (MCA)

Como o MCA desenvolvido nesse documento leva em consideração os resultados das isothermas obtidas no *software* Abaqus/CAE, adaptando as profundidades de carbonização ao MRP, tem-se, para o tempo de incêndio de 90 min, os seguintes resultados de M_{rc} e M_{rt} (as isothermas obtidas no *software* são apresentadas na Figura 52):

Figura 52: Isotermas de viga de *Pinus elliotti* no tempo de incêndio de 90 min

$$d = 51 \text{ mm}$$

$$A = 0,1128 \text{ m}^2$$

$$P = 1,2522 \text{ m}$$

$$M_{rc} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,0097655 = 394,526 \text{ kN. m}$$

$$M_{rt} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,0095732 = 631,829 \text{ kN. m}$$

$$k_{\text{mod,fi}} = 1 - \frac{P}{(200 \times A)} = 1 - \frac{1,2522}{(200 \times 0,1128)} = 0,94449$$

$$M_{rc,fi} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{rc} = 0,94449 \times 394,526 = 372,625 \text{ kN. m}$$

$$M_{rt,fi} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{rt} = 0,94449 \times 631,829 = 596,755 \text{ kN. m}$$

APÊNDICE C – CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS COM O MÉTODO ELABORADO PELO AUTOR

Nesse apêndice, apresentam-se os cálculos de resistência da viga de *Pinus elliotti* à flexão no tempo de incêndio de 90 min por meio do método de cálculo elaborado pelo Autor. Não se faz necessário apresentar o desenvolvimento matemático das vigas de outras espécies e de outros tempos de incêndio, dada a repetição das equações.

O primeiro passo para o desenvolvimento do cálculo pelo método elaborado pelo Autor é a determinação da taxa de carbonização média $\beta_{\text{méd}}$. Sabendo-se o tempo de incêndio (90 min) e a densidade aparente da madeira à umidade de 12% (*Pinus elliotti* – 560 kg/m³), obtém-se:

$$\beta_{\text{méd}} = \frac{60^{0,187} \times \left[0,4 + \left(\frac{280}{\rho_{12}} \right)^2 \right]}{t^{0,187}} = \frac{60^{0,187} \times \left[0,4 + \left(\frac{280}{560} \right)^2 \right]}{90^{0,187}} = 0,603 \text{ mm/min}$$

Com a taxa de carbonização média definida, parte-se para o uso do método de redução de propriedades, sendo seu primeiro passo a definição da profundidade de carbonização d , dada por:

$$d = \beta_{\text{méd}} \times t = 0,603 \times 90 = 54,23 \text{ mm}$$

A seção residual, já demonstrada pela Figura 51 (Apêndice B), apresenta as dimensões: largura b igual a 19,2 cm; altura h igual a 54,6 cm; raio r nos cantos inferiores igual a 5,4 cm; área A igual a 0,1092 m²; e perímetro P igual a 1,2365 m.

Para a determinação do $k_{\text{mod,fi}}$, utiliza-se a equação:

$$k_{\text{mod,fi}} = 1 - \frac{P}{(200 \times A)} = 1 - \frac{1,2365}{(200 \times 0,1092)} = 0,94336$$

Por fim, verifica-se a resistência da viga à flexão:

$$M_{\text{rc}} = 1.000 \times f_{c0} \times W_c = 1.000 \times 40,4 \times 0,0093079 = 376,038 \text{ kN.m}$$

$$M_{\text{rt}} = 1.000 \times f_{t0} \times W_t = 1.000 \times 66 \times 0,009093 = 600,136 \text{ kN.m}$$

$$M_{\text{rc,fi}} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{\text{rc}} = 0,94449 \times 394,526 = 354,739 \text{ kN.m}$$

$$M_{\text{rt,fi}} = k_{\text{mod,fi}} \times M_{\text{rt}} = 0,94449 \times 631,829 = 566,145 \text{ kN.m}$$