

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E GEOTECNIA

MAURIZIO VAIRO

Sobre o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio

São Paulo

2022

MAURIZIO VAIRO

Sobre o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Pignatta Silva.

São Paulo

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de junho de 2022

Assinatura do autor: Maurício Vairo

Assinatura do orientador: [assinatura]

Vairo, Maurizio

Sobre o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio /
M. Vairo -- versão corr. -- São Paulo, 2022.
135 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Estruturas de Madeira 2.Cross Laminated Timber (CLT) 3.Ensaio de resistência ao fogo 4.Taxa de carbonização 5.Delaminação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Valdir Pignatta Silva pelo apoio, orientações e paciência ao longo dos anos de desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Júnior pelas orientações e dedicação na divulgação das pesquisas de estruturas de madeira.

À empresa Amata Urbem pela oportunidade que me foi dada de realizar a pesquisa em um tema inovador e fascinante, e a todos os meus queridos amigos de trabalho pelo apoio e incentivo dados nos últimos anos, em especial aos meus companheiros de pesquisa Ana Carolina Belizário e Dr. Felipe Hideyoshi Icimoto.

Aos colaboradores e corpo técnico do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e do Laboratório de Segurança Contra Incêndio da *itt* Performance do Instituto Tecnológico da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, pela preparação e realização dos ensaios.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade que me foi dada de realizar esta pesquisa.

Aos meus amigos Cap. Matheus von Gal de Almeida Stamato e Dr. Luís Filipe Carvalho Jorge, pelas inúmeras conversas enriquecedoras.

À minha companheira Larissa, pela parceria de sempre.

À minha família, especialmente a meus pais, Vicente e Tânia, e a meus irmãos, Vinícius e Ana Eliza.

RESUMO

VAIRO, M. **Sobre o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio**. 2022. 135 p. (Dissertação de Mestrado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

O *Cross Laminated Timber* é considerado um produto inovador no mercado da construção civil. Nos últimos anos, tem-se observado um interesse crescente na utilização dessa tecnologia construtiva no Brasil. Por se tratar de um produto de uso estrutural fabricado a partir de um material combustível, a madeira, existem inúmeras preocupações relacionadas à segurança das edificações de *Cross Laminated Timber* em situação de incêndio, principalmente quando se nota a adoção da tecnologia em construções cada vez mais altas e complexas ao redor do mundo. Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o comportamento do produto industrializado de madeira no contexto brasileiro, foram realizados dois ensaios laboratoriais em painéis de *Cross Laminated Timber* em escala real de construção, seguindo os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 5628. O primeiro teste foi realizado em uma amostra de laje de 13 cm de espessura, utilizando o forno horizontal a gás (3,0 m x 4,0 m) da Universidade de São Paulo, localizado no campus de São Carlos. Um carregamento vertical de 3 kN/m² foi aplicado sobre a amostra, que foi exposta a 30 minutos da curva de incêndio-padrão estabelecida pela ISO 834. O segundo teste foi realizado em uma parede de 14 cm de espessura, utilizando o forno vertical a gás (3,15 m x 2,8 m) da itt Performance do Instituto Tecnológico da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, localizado na cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul. Um carregamento de 80 kN/m foi aplicado sobre as amostras de parede durante 60 minutos do programa térmico padrão. Os resultados obtidos a partir do ensaio de lajes indicaram que os elementos estruturais de madeira mantiveram a integridade, o isolamento térmico e a capacidade resistente, mesmo considerando as 24 horas após o desligamento dos queimadores. No caso do ensaio de parede, durante os 60 minutos do programa térmico ativo, os painéis mantiveram a integridade, o isolamento térmico e a capacidade resistente. Entretanto, durante a etapa de resfriamento natural da amostra, ocorreram sucessivos deslocamentos das lamelas dos painéis, impedindo a análise do produto 24 horas após o ensaio. A investigação experimental indicou que a utilização de adesivos não resistentes ao fogo representa um risco para a segurança das estruturas de *Cross Laminated Timber* em situação de incêndio.

Palavras-chave: estruturas de madeira, *Cross Laminated Timber*, CLT, ensaio de resistência ao fogo, taxa de carbonização, curva de incêndio-padrão, auto extinção, delaminação, análise pós-incêndio.

ABSTRACT

VAIRO, M. **Fire behavior of CLT panels**. 2022. 135 p. (Master's Degree Thesis) - Department of Structural Engineering and Geotechnics at the Polytechnic School of the University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil.

Cross-Laminated Timber is considered a novelty in the Brazilian construction market, with a growing interest in the use of this technology all over the country in the last years. Regarding the fact that Cross-Laminated Timber is a structural product made from a combustible material, wood, there are numerous concerns regarding the safety of this type of construction in fire, especially considering the adoption of this technology in tall buildings around the world. Observing that there is a lack of studies focused on the fire safety of timber structures in the Brazilian context, the research intends to understand the behaviour of mass timber products from the assessment of Cross-Laminated Timber panels according to the Brazilian standard NBR 5628: 2001 Structural building components - determination of fire resistance. Two tests were carried out to determine the structural resistance of the Cross-Laminated Timber panels in fire. The first test was performed on a 13 cm thick slab, using the horizontal gas furnace (3.0 m x 4.0 m) of the University of Sao Paulo in Sao Carlos. A vertical load of 3 kN/m² was applied over the slab, which was exposed to 30 minutes of the standard fire curve established by ISO 834. The second test was carried out on a 14 cm thick wall, using the vertical gas furnace (3.15 m x 2.8 m) from the University of Vale do Rio dos Sinos in Sao Leopoldo. A vertical load of 80 kN/m was applied on the wall, which was exposed to 60 minutes of the ISO 834 fire curve. The results obtained from the slab test indicated that the mass timber panels maintained their integrity, thermal insulation and loadbearing capacity, even considering the 24 hours after the burners were turned off. In the case of the wall test, during the first 60 minutes, the panels maintained their integrity, thermal insulation and loadbearing capacity. However, during the natural cooling phase of the test, falling-off of the charred layer occurred, preventing the analysis of the product 24 hours after the test. The experimental research has indicated that the use of adhesives non-resistant to fire to manufacture the panels represents a risk to the safety of Cross Laminated Timber structures in fire.

Keywords: timber structures, Cross-Laminated Timber, CLT, fire resistance tests, charring rate, standard fire curve, self-extinguishment, delamination, post-fire analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Içamento de uma laje de CLT.....	20
Figura 1.2 - Edifício <i>Forté</i> , Melbourne.....	21
Figura 1.3 - <i>Brock Commons</i> , Vancouver.....	21
Figura 1.4 - Edifício em CLT, São Paulo.....	22
Figura 2.1 – Seção transversal de uma árvore.....	26
Figura 2.2 - Eixos de simetria da madeira.....	27
Figura 2.3 - Influência da umidade nas propriedades da madeira.....	30
Figura 2.4 – Linha do Tempo dos Produtos de Madeira Engenheirada.....	31
Figura 2.5 - Produtos de madeira massiva.....	33
Figura 2.6 – Vista isométrica de um painel de CLT.....	34
Figura 2.7 - Seções transversais típicas dos painéis de CLT.....	35
Figura 2.8 – Tipos de construção de madeira nos EUA.....	38
Figura 2.9 – Mapa normativo.....	41
Figura 2.10 – CLT unidirecional.....	42
Figura 2.11 – CLT bidirecional.....	42
Figura 2.12 – Representação do comportamento do CLT flexionado.....	43
Figura 2.13 – Geometria para Método Gama.....	44
Figura 2.14 – Comparativo entre os principais métodos de cálculo de CLT.....	44
Figura 2.15 – Taxa de queima da madeira.....	46
Figura 2.16 – Processo de degradação térmica da madeira.....	46
Figura 2.17 – Redução da resistência.....	48
Figura 2.18 – Redução da rigidez.....	48
Figura 2.19 – Método da seção reduzida.....	48
Figura 2.20 – Substituição de áreas.....	49
Figura 2.21 – Calor específico da madeira.....	51
Figura 2.22 – Condutividade térmica da madeira.....	51
Figura 2.23 – Variação da densidade da madeira a partir de $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ e $U_{eq} = 12\%$	52
Figura 2.24 – Carbonização de madeira exposta ao fogo e com revestimento resistente ao fogo.....	53
Figura 2.25 – Coeficiente k_0 para madeira revestida.....	53
Figura 2.26 – Taxa de carbonização das placas de CLT com e sem delaminação.....	54
Figura 2.27 – Fluxograma para cálculo de d_0 na superfície tracionada e lajes de CLT.....	56
Figura 2.28 – Momentos fletores nas regiões “A” e “B” de uma laje.....	56
Figura 2.29 – Fluxograma para cálculo de d_0 na superfície comprimida de lajes de CLT.....	57

Figura 2.30 - Curva normal para determinação da resistência da madeira.	58
Figura 2.31 - Perda de capacidade resistente incêndio padrão x incêndio real.	59
Figura 2.32 - Curva de um incêndio real.....	61
Figura 2.33 - Comparativo entre curvas de incêndios naturais e a curva ISO 834.	62
Figura 2.34 - Comparativo entre curvas de incêndios naturais em estruturas de concreto e de CLT. ..	64
Figura 2.35 – Fluxo de calor radiante cruzado.....	66
Figura 2.36 – Fluxograma para auto extinção do CLT.	66
Figura 2.37 – Incêndio natural com e sem delaminação.	67
Figura 2.38 – Detalhes de junções entre painéis de CLT.....	69
Figura 2.39 – Fluxo de temperatura através do CLT.	71
Figura 2.40 – Ligações de peças de madeira expostas diretamente ao fogo.	72
Figura 2.41 – Conexões protegidas com elementos de madeira.	73
Figura 2.42 – Detalhe de parafusos embutidos no CLT.....	74
Figura 2.43 – Cantoneiras metálicas expostas ao fogo.	75
Figura 2.44 – Chapa metálica corroída por um retardante de chamas à base de fósforo.	79
Figura 3.1 – Curva de incêndio-padrão ISO 834.....	85
Figura 3.2 - Amostras de painéis de CLT.	87
Figura 3.3 – <i>Firestop</i>	88
Figura 3.4 - Parafusos auto perfurantes.....	88
Figura 3.5 – Seção transversal da amostra.	88
Figura 3.6 – Amostra com carregamento.	89
Figura 3.7 – Distribuição dos termopares ao longo da seção transversal em <i>mm</i>	89
Figura 3.8 - Distribuição dos termopares em planta em <i>cm</i>	90
Figura 3.9 - Foto da instalação de um termopar no painel de CLT.....	90
Figura 3.10 - Fixação dos transdutores na laje de CLT.....	90
Figura 3.11 - Distribuição dos transdutores em planta em <i>cm</i>	90
Figura 3.12 – Forno horizontal.....	91
Figura 3.13 – Válvulas do forno.....	91
Figura 3.14 - Termopares conectados ao painel de controle.	92
Figura 3.15 – Distribuição dos termopares no forno.....	92
Figura 3.16 - Vista isométrica da parede de CLT.	94
Figura 3.17 – <i>Masterpanel</i> para a confecção das amostras de parede de CLT.	94
Figura 3.18 - Distribuição dos termopares na parede de CLT.	95
Figura 3.19 – Vista dos termopares internos do forno vertical.	96
Figura 3.20 – Vista dos queimadores a gás.	97

Figura 4.1 – Comparativo entre a curva ISO 834 e temperaturas internas do forno.	98
Figura 4.2 - Comparativo entre a temperatura média do forno e os limites de norma.	99
Figura 4.3 - Passagem de fumaça entre o painel de CLT e a parede do forno.	99
Figura 4.4 - Verificação da ignição do chumaço de algodão na emenda entre painéis.	99
Figura 4.5 – Temperatura na face não exposta ao fogo.	100
Figura 4.6 – Deslocamentos na primeira fase do ensaio.	100
Figura 4.7 – Deslocamentos na fase de reaplicação do carregamento vertical.	101
Figura 4.8 – Deslocamentos ao longo de todo o ensaio.	102
Figura 4.9 – Temperatura nos termopares T15.	102
Figura 4.10 - Painel de CLT cortado em 21 peças.	103
Figura 4.11 - Peça de CLT posicionada sobre a mesa para demarcação da malha.	104
Figura 4.12 - Medição da seção residual com o auxílio de um esquadro.	104
Figura 4.13 - Medição da seção residual com auxílio de um paquímetro.	105
Figura 4.14 - Malha representando a espessura residual virgem do painel de CLT em <i>cm</i>	105
Figura 4.15 - Malha representando a espessura carbonizada do painel de CLT em <i>cm</i>	106
Figura 4.16 - Frequência de ocorrências das espessuras carbonizadas.	106
Figura 4.17 – Carbonização de ensaio versus carbonização calculada em <i>cm</i>	107
Figura 4.18 - Carbonização na região de nós.	107
Figura 4.19 - Carbonização nas emendas.	107
Figura 4.20 – Temperatura interna do forno.	108
Figura 4.21 - Evolução da temperatura nos termopares da série T30.	108
Figura 4.22 - Evolução da temperatura nos termopares da série T50.	109
Figura 4.23 - Evolução da temperatura nos termopares da série T80.	109
Figura 4.24 - Evolução da temperatura nos termopares da série T100.	109
Figura 4.25 - Laje de CLT posicionada sobre o forno.	110
Figura 4.26 - Laje de CLT sendo removida do forno.	110
Figura 4.27 - Vista inferior da laje de CLT após o ensaio.	111
Figura 4.28 - Vista lateral de um painel de CLT após o ensaio.	111
Figura 4.29 - Vista inferior de meia laje de CLT após o ensaio.	112
Figura 4.30 - Painel de CLT usinado após o teste.	112
Figura 4.31 - Vista lateral do painel de CLT usinado após o teste.	113
Figura 4.32 – Perfil de temperaturas nos termopares.	113
Figura 4.33 - Comparativo entre ISO 834 e temperaturas internas do forno.	114
Figura 4.34 - Comparativo entre temperatura média do forno e tolerância de norma.	115
Figura 4.35 - Passagem de fumaça entre o painel e o forno vertical.	115

Figura 4.36 - Medição de temperatura dos termopares da série T140.	116
Figura 4.37 - Aberturas na parede de CLT durante o ensaio de resistência ao fogo.	117
Figura 4.38 - Extinção do fogo dos painéis de CLT.	117
Figura 4.39 - Vista da parede após o teste.	118
Figura 4.40 - CLT após o deslocamento.	118
Figura 4.41 - Carvão acumulado na base do forno.	119
Figura 4.42 - Comparativo entre as temperaturas na parte inferior e superior do forno.	119

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE A

Figura A.1 - Layout da Calcula Timber CLT.	131
Figura A.2 - Preenchimento manual das seções transversais.	132
Figura A.3 - Opções de classes de resistência do CLT.	132
Figura A.4 - Verificação do Estado Limite Último do CLT.	133
Figura A.5 – Verificação do Estado Limite de Serviço do CLT.	133
Figura A.6 - Verificação do CLT em situação de incêndio.	134
Figura A.7 - Aba de ponderadores para a verificação dos painéis de CLT.	134
Figura A.8 - Considerações de carregamentos sobre os painéis de CLT.	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparativo entre as propriedades dos materiais.	25
Tabela 2.2: Classes de resistência.	28
Tabela 2.3: Coeficiente de Modificação k_{mod1}	29
Tabela 2.4: Coeficientes C_t	30
Tabela 2.5 – Limites de dimensões para as construções em madeira nos EUA.	37
Tabela 2.6: Taxas de carbonização da madeira.	47
Tabela 2.7: Calor específico da madeira.	50
Tabela 2.8: Condutividade térmica da madeira.	51
Tabela 2.9: Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) em minutos.	60
Tabela 2.10: Classes de reação ao fogo de materiais de revestimento.	76
Tabela 2.11: Classes de reação ao fogo europeias.	76
Tabela 2.12: Caracterização dos materiais.	78
Tabela 2.13: Características dos retardantes e vernizes intumescentes.	80
Tabela 4.1: Temperaturas máximas nos termopares.	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APA	<i>The Engineered Wood Association</i>
AWC	<i>American Wood Council</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CWC	<i>Canadian Wood Council</i>
DLT	<i>Dowel Laminated Timber</i>
EAD	<i>European Assessment Document</i>
EESC	<i>Escola de Engenharia de São Carlos</i>
EMTC	<i>Encapsulated Mass Timber Construction</i>
EN	<i>European Standards</i>
EOTA	<i>European Organization for Technical Assessment</i>
ETA	<i>European Technical Assessment</i>
FIGRA	Índice da Taxa de Desenvolvimento de Fogo
FS	Tempo para a Chama Atingir 150 mm no Ensaio de SBI
GLT	<i>Glued Laminated Timber</i>
HC	<i>Heavy Timber Construction</i>
ICC	<i>International Code Council</i>
IFC	<i>International Fire Code</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

IT	Instrução Técnica
LE	Laboratório de Estruturas
LFS	Propagação Lateral de Chamas
LSCI	Laboratório de Segurança Contra Incêndio
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
MLP	Madeira Lamelada Protendida
NBR	Norma Brasileira
NBC	<i>National Building Code of Canada</i>
NDS	<i>National Design Specifications for Wood Construction</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NLT	<i>Nail Laminated Timber</i>
NRC	<i>National Research Council Canada</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
SBI	<i>Standard Burning Item</i>
SET	Departamento de Engenharia de Estruturas
SMOGRA	Índice da Taxa de Desenvolvimento de Fumaça
THR	Liberação Total de Calor do Material
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
TSP	Produção Total de Fumaça
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Espessura em que a madeira é afetada pela temperatura
a_1, a_3, a_5	Distância entre o centro geométrico das lamelas longitudinais e o centro geométrico de um painel de CLT
A_{CLT}	Área total de CLT exposto ao fogo
A_f	Área total do piso
A_t	Somatória das áreas de piso, teto, paredes e aberturas de um compartimento
A_v	Área total de aberturas de um compartimento para o ambiente externo
b	Largura de um painel de CLT ou parâmetro que leva em consideração as características físico-térmicas dos materiais de um compartimento
c	Calor específico
C_t	Fator de modificação em relação à temperatura
d_{char}	Espessura de madeira carbonizada
d_{ef}	Espessura de madeira afetada pelo incêndio
d_0	Espessura da camada de resistência nula
$E_{0,m}$	Valor médio do módulo de elasticidade à flexão paralelo às fibras
$E_{0,05}$	Valor característico inferior (quinto percentil) do módulo de elasticidade à flexão paralelo às fibras
$E_{90,m}$	Valor médio do módulo de elasticidade à flexão perpendicular às fibras
$f_{b,k}$	Valor característico da resistência à flexão
f_c	Valor dos esforços resistentes de compressão
$f_{c,0,k}$	Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras
$f_{c,90,k}$	Valor característico da resistência à compressão perpendicular às fibras
f_k	Valor característicos dos esforços resistentes
$f_{t,0,k}$	Valor característico da resistência à tração paralela às fibras

$f_{t,90,k}$	Valor característico da resistência à tração perpendicular às fibras
$f_{v,k}$	Valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
G_m	Valor médio do módulo de elasticidade transversal
G_{90}	Valor do módulo de elasticidade transversal ao <i>rolling-shear</i>
h	Altura até o útil pavimento habitável de uma edificação
h_{eq}	Altura média das aberturas de um compartimento para o ambiente externo
H	Espessura do painel de CLT
I_{ef}	Inércia efetiva
k_{fi}	Coefficiente de majoração da resistência da madeira em situação de incêndio
k_j	Coefficiente de junção entre painéis de CLT
k_{mod}	Coefficiente de modificação de resistência e de rigidez
k_{mod1}	Coefficiente de modificação de resistência e de rigidez em função da duração do carregamento
k_{mod2}	Coefficiente de modificação de resistência e de rigidez em função da umidade
k_{mod3}	Coefficiente de modificação de resistência e de rigidez em função da temperatura, da curvatura da peça e da presença de emendas dentadas
$k_{mod,fi}$	Coefficiente de modificação de resistência e de rigidez em situação de incêndio
k_x	Condutividade térmica no eixo x
k_y	Condutividade térmica no eixo y
k_z	Condutividade térmica no eixo z
k_0	Coefficiente que relaciona a espessura de camada de resistência nula ao tempo de incêndio
L	Comprimento do vão
M	Momento fletor
$q_{fi,d}$	Carga de incêndio de cálculo total relacionada à área do piso

$q_{t,d}$	Carga de incêndio de cálculo total relacionada à área do compartimento
Q'	Calor gerado pela madeira
R_d	Valor de cálculo dos esforços resistentes
$R_{d,fi}$	Valor de cálculo dos esforços resistentes em situação de incêndio
R_k	Valor característico dos esforços resistentes
R_m	Valor médio dos esforços resistentes
R_{20}	Valor do vigésimo percentil dos esforços resistentes
S_d	Valor de cálculo dos esforços atuantes
$S_{d,fi}$	Valor de cálculo dos esforços atuantes em situação de incêndio
t	Tempo, em minutos ou em horas
t_{ch}	Tempo para o início da carbonização da madeira
t_{lim}	Tempo limite
t_{max}	Tempo máximo
t_0	Tempo inicial calculado em função da carga de incêndio e da ventilação de um compartimento
t_1, t_3, t_5	Espessura das lamelas longitudinais de um painel de CLT
t_2, t_4	Espessura das lamelas transversais de um painel de CLT
T	Temperatura, em K
U_{amb}	Umidade do ambiente
U_{eq}	Umidade de equilíbrio da madeira
V	Cisalhamento
x	Distância entre a camada de carvão e qualquer ponto da seção transversal
α_1	Coeficiente que relaciona a quantidade de calor emitida e a camada de carvão
β	Taxa de carbonização
β_{par}	Taxa de carbonização de um incêndio parametrizado

β_0	Taxa de carbonização
γ	Coefficiente de minoração das resistências da madeira
$\gamma_{m,fi}$	Coefficiente de minoração das resistências da madeira em situação de incêndio
$\gamma_1, \gamma_3, \gamma_5$	Coefficientes de redução de inércia de um painel de CLT associados ao Método Gama
Γ	Coefficiente que relaciona o grau de ventilação às características físico-térmicas dos materiais de um compartimento
η	Fator de conversão dos esforços atuantes a temperatura ambiente para situação de incêndio
θ	Temperatura ambiente, em °C
θ_g	Temperatura dos gases de um incêndio, em °C
$\theta_{g,max}$	Temperatura máxima dos gases de um incêndio, em °C
θ_p	Temperatura na camada carbonizada, em °C
θ_0	Temperatura ambiente, em °C
λ	Condutividade térmica
ν	Grau de ventilação de um compartimento
ρ	Densidade
ρ_k	Densidade característica
ρ_m	Densidade média
χ	Parâmetro de controle de um incêndio compartimentado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa.....	23
1.2	Objetivos	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Sobre a madeira.....	24
2.1.1	<i>Tipos de madeira</i>	24
2.1.2	<i>Produtos de madeira engenheirada</i>	31
2.2	Sobre o CLT.....	34
2.2.1	<i>Produto.....</i>	34
2.2.2	<i>Normas, legislação e código de obras.....</i>	35
2.2.3	<i>Métodos de cálculo de painéis de CLT à temperatura ambiente</i>	41
2.3	Comportamento da Madeira em Situação de Incêndio.....	45
2.3.1	<i>Carbonização.....</i>	45
2.3.2	<i>Perda de resistência e elasticidade em função da temperatura.....</i>	47
2.3.3	<i>Propriedades térmicas da madeira</i>	50
2.3.4	<i>Madeira revestida com material contra fogo</i>	52
2.4	Sobre o CLT em Situação de Incêndio.....	54
2.4.1	<i>Carbonização do CLT</i>	54
2.4.2	<i>Ações e segurança das estruturas em CLT em situação de incêndio</i>	57
2.4.3	<i>Curvas paramétricas em estruturas de CLT.....</i>	59
2.4.4	<i>Auto extinção de um incêndio</i>	65
2.4.5	<i>Compartimentação em estruturas de CLT.....</i>	68
2.4.6	<i>Ligações das estruturas de madeira.....</i>	72
2.4.7	<i>Reação ao fogo.....</i>	75
2.5	Conclusões	80
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
3.1	Ensaio de resistência ao fogo de uma laje de CLT	87
3.1.1	<i>Detalhamento das amostras</i>	87
3.1.2	<i>Carregamento sobre os painéis de CLT</i>	88
3.1.3	<i>Instrumentação para medição de temperatura e dos deslocamentos</i>	89
3.1.4	<i>Forno horizontal</i>	91
3.1.5	<i>Duração do ensaio.....</i>	93
3.2	Ensaio de resistência ao fogo de uma parede de CLT	93

3.2.1	<i>Detalhamento das amostras</i>	93
3.2.2	<i>Carregamento sobre a parede de CLT</i>	95
3.2.3	<i>Instrumentação para medição de temperatura e dos deslocamentos</i>	95
3.2.4	<i>Forno vertical</i>	96
3.2.5	<i>Duração do ensaio</i>	97
4	RESULTADOS	98
4.1	Resultados do ensaio de painéis de lajes de CLT	98
4.1.1	<i>Estanqueidade</i>	99
4.1.2	<i>Isolamento térmico</i>	99
4.1.3	<i>Deslocamentos</i>	100
4.1.4	<i>Espessura da camada carbonizada</i>	102
4.1.5	<i>Desplacamento das lamelas</i>	107
4.1.6	<i>Perfil de temperatura</i>	113
4.2	Resultados do ensaio de painéis de paredes de CLT	114
4.2.1	<i>Estanqueidade</i>	115
4.2.2	<i>Isolamento térmico</i>	116
4.2.3	<i>Deslocamentos</i>	116
4.2.4	<i>Resultados adicionais</i>	116
5	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	120
5.1	Conclusões sobre o ensaio de lajes de CLT	120
5.2	Conclusões sobre o ensaio de paredes de CLT	121
5.3	Observações finais e recomendações	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	APÊNDICE A – Calculadora de verificação de lajes de CLT	131

1 INTRODUÇÃO

Edificações construídas com estruturas de madeira são amplamente utilizadas pela humanidade desde a época pré-histórica. Países europeus como, por exemplo, Áustria, Alemanha e Noruega mantiveram a tradição nesse tipo de construção, mesmo após o surgimento de outros materiais estruturais, tais como o aço e o concreto armado. Na América do Norte, Canadá e Estados Unidos constroem a maioria das residências unifamiliares utilizando estruturas de madeira [1].

No início dos anos de 1990, empresas europeias do setor madeireiro em conjunto com a comunidade científica de universidades da Áustria e da Alemanha desenvolveram o produto de madeira massiva conhecido como *Cross Laminated Timber* (CLT) [2], traduzido para o português como Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC).

O CLT é um elemento sólido de madeira para uso estrutural, comumente utilizado nas funções de lajes e de paredes. As peças são fabricadas a partir da colagem sob pressão de lamelas de madeira de coníferas posicionadas em camadas perpendiculares entre si.

Os painéis possuem ao menos três camadas adjacentes e usualmente são produzidos com largura máxima de 3,0 m por 16,0 m de comprimento, com espessura total variando entre 6,0 e 35,0 cm [3]. A Figura 1.1 ilustra o içamento de um painel de CLT utilizado como laje.

Figura 1.1 - Içamento de uma laje de CLT.



(Fonte: próprio autor).

O CLT possui características que o diferencia de outros painéis pré-fabricados de uso estrutural. Dentre elas, pode-se destacar a alta relação entre a capacidade resistente e o peso próprio, o alto desempenho térmico e acústico, o baixo peso próprio, a estabilidade dimensional das peças que permite a produção de painéis com grandes dimensões, além de ser um produto fabricado a partir de matéria prima de fonte renovável [2].

Tais características viabilizaram, a partir do início dos anos 2000, a construção de edifícios altos utilizando estruturas em CLT. Uma das primeiras construções é a torre inglesa de nove andares *Murray Grove*, concluída em 2008 [4]. Em 2012, é construído o edifício de dez pavimentos conhecido como *Forté* (Figura 1.2), erguido na cidade de Melbourne, Austrália [5].

Em 2017, foi finalizada a construção do primeiro edifício com mais de 60 metros de altura. A torre de dezoito pavimentos, conhecida como *Brock Commons* (Figura 1.3), foi erguida na cidade de Vancouver, Canadá [6]. Durante dois anos, foi a edificação em madeira engenheirada mais alta do mundo, sendo superada em 2019 pela torre norueguesa *Mjøstårnet*, com altura aproximada de 85 metros [4].

Figura 1.2 - Edifício *Forté*, Melbourne.



(Fonte: próprio autor).

Figura 1.3 - *Brock Commons*, Vancouver.



(Fonte: próprio autor).

Os Estados Unidos também têm acompanhado a evolução das construções em altura utilizando madeira massiva. No primeiro semestre de 2022, foi concluída a montagem do

edifício mais alto de madeira do mundo. Conhecido como *Ascent*, a torre de 25 pavimentos possui 85,4 metros de altura e está localizada na cidade de Milwaukee [7].

Liderado pelas construções de grande porte, observa-se um crescimento exponencial no uso do CLT nas últimas décadas. Somente no ano de 2018, o volume de painéis de madeira engenheirada produzido pelas principais empresas europeias superou o valor de 1 milhão de metros cúbicos [2]. Corroborando as informações anteriores, estima-se que aproximadamente 200 edifícios de madeira massiva com pelo menos 5 pavimentos de altura tenham sido construídos nas últimas duas décadas [8].

A tendência observada na Europa e na América do Norte também pode ser notada na América do Sul. No Brasil, uma das primeiras edificações em altura utilizando painéis de CLT foi concluída em 2020 (Figura 1.4). Localizada na cidade de São Paulo, a construção possui uma área de 1500 m² distribuídos em quatro pavimentos. No total, foram utilizadas 120 placas de CLT, divididas entre lajes e paredes do edifício, somando um volume de 145 m³ do produto de madeira massiva.

Figura 1.4 - Edifício em CLT, São Paulo.



(Fonte: próprio autor).

1.1 Justificativa

Tendo em vista o crescimento do uso da madeira engenheirada em edificações altas e cada vez mais complexas, a sociedade tem se questionado acerca da segurança das estruturas de tais construções em situação de incêndio.

Com o objetivo de estudar o comportamento das estruturas de CLT quando submetidas a elevadas temperaturas, os países da Europa e da América do Norte têm desenvolvido uma série de pesquisas nos últimos anos, com especial atenção para aquelas elaboradas a partir da realização de ensaios laboratoriais em diferentes escalas.

Observando a tendência global para adoção da madeira massiva em edifícios de múltiplos pavimentos somada a uma carência de estudos voltados para a área de segurança das estruturas de CLT em situação de incêndio no contexto brasileiro, compreende-se que existe a necessidade da realização de uma pesquisa aprofundada sobre o tema, objetivando o desenvolvimento da tecnologia no país de forma segura.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em estudar o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio. Para tanto, o trabalho foi dividido em duas etapas.

Na primeira etapa, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, onde foram estudadas as principais características da madeira e dos produtos de madeira engenheirada em temperatura ambiente, com especial atenção dada às normas e aos métodos de cálculo e de produção dos painéis de CLT.

A pesquisa se estendeu para o estudo do comportamento da madeira em situação de incêndio, que serviu como fundamentação teórica para a realização da pesquisa sobre a degradação térmica dos painéis de madeira engenheirada. Adicionalmente, foram estudados os principais itens relacionados à segurança contra incêndio das edificações em CLT.

Na segunda etapa, foram realizados dois ensaios laboratoriais em escala real de construção, seguindo as orientações estabelecidas pelas normas brasileiras. O primeiro teste foi realizado em uma laje de CLT e o segundo em uma parede construída com o mesmo produto. Os testes permitiram estudar a taxa de carbonização dos painéis de CLT, as condições necessárias para o deslocamento das lamelas, a perda de resistência da madeira em elevadas temperaturas bem como as características de isolamento térmico e de estanqueidade das placas de CLT.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo foi dividido em cinco partes. Na primeira parte, foram estudadas as principais características mecânicas, físicas e químicas da madeira em temperatura ambiente. Adicionalmente, foram apresentados os processos de fabricação dos produtos de madeira engenheirada mais utilizados na construção civil.

Na segunda parte deste capítulo, foram estudados os principais itens relacionados ao CLT e às edificações que utilizam os produtos de madeira massiva, abordando as normas de projeto, as normas de produção e os códigos de obras que legislam sobre as construções em madeira massiva em altura.

Na terceira parte do trabalho, foram estudadas as questões relacionadas ao comportamento da madeira em situação de incêndio, discutindo itens tais como o processo de degradação térmica do material, a perda de resistência e de rigidez e a alteração das propriedades térmicas da madeira quando submetida a elevadas temperaturas.

Na quarta parte deste capítulo, o comportamento dos painéis de CLT em situação de incêndio foi estudado, abordando aspectos tais como a influência do tipo de adesivo estrutural utilizado para a produção dos painéis, o fenômeno da auto extinção do fogo em edificações em madeira massiva, detalhamentos necessários para garantir a estanqueidade e o isolamento térmico de construções em CLT, proteções das conexões metálicas para garantir a segurança das estruturas em situação de incêndio, propriedades de reação ao fogo e a necessidade da aplicação de retardantes de chama nas superfícies dos painéis, acréscimo de carga térmica em função da área de CLT exposta ao fogo, entre outros.

Na quinta e última parte deste capítulo, foi elaborado um texto com as principais conclusões obtidas a partir da revisão bibliográfica.

2.1 Sobre a madeira

2.1.1 Tipos de madeira

A madeira é um recurso natural de fonte renovável e, possivelmente, o material mais antigo utilizado nas construções [9]. Possui elevada razão entre resistência mecânica e densidade quando comparada a outros materiais de uso estrutural, tais como o aço e o concreto, conforme ilustrado pela Tabela 2.1. Possui também boa performance térmica e acústica.

Tabela 2.1: Comparativo entre as propriedades dos materiais.

Material estrutural	Densidade ρ [kN.m ⁻³]	Resistência à Compressão f_c [kN.m ⁻²]	Razão f_c/ρ [kN.m ⁻² /kN.m ⁻³]
Madeira	5,0	30.000	6.000
Concreto	25,0	30.000	1.200
Aço	78,5	250.000	3.200

(Fonte: próprio autor).

As madeiras podem ser divididas em duas categorias: as madeiras moles ou macias, internacionalmente denominadas de *softwoods* e as madeiras duras, também conhecidas como *hardwoods*.

Usualmente, as madeiras macias são extraídas de árvores coníferas, principal classe dentre as gimnospermas. Tipicamente, são árvores oriundas de florestas do hemisfério norte. Entretanto, no Brasil, é possível encontrar uma espécie de conífera nativa, o Pinho-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*) [10]. Por outro lado, as madeiras duras são obtidas de árvores folhosas, principalmente de angiospermas da classe das dicotiledôneas. Esse tipo de árvore constitui a quase totalidade das espécies nativas das florestas tropicais do Brasil [10].

As madeiras macias são extraídas de árvores de crescimento rápido e, geralmente, possuem baixa densidade [11]. Quando comparadas às madeiras duras, as macias possuem menor resistência mecânica além de durabilidade natural inferior, com exceção feita às peças tratadas em autoclave com produtos preservativos impregnados na madeira. Dentre as mais de quinhentas espécies de coníferas catalogadas [10], destacam-se o pinus (*Pinus spp*) e o abeto (*Picea abies*).

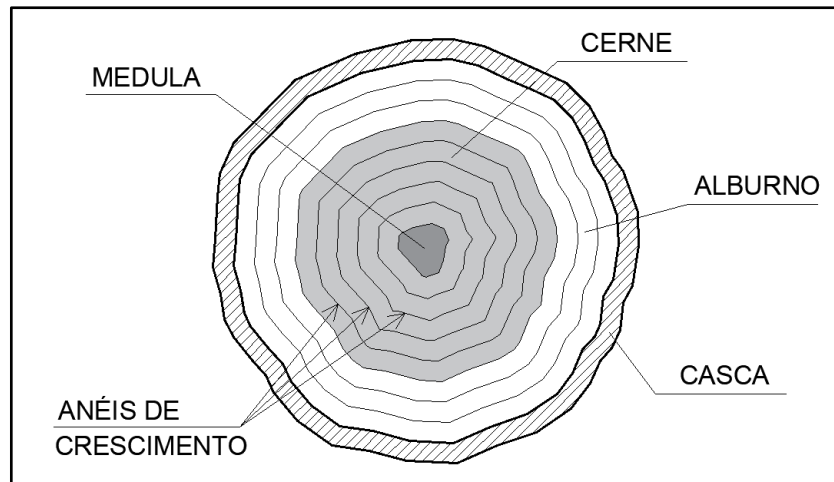
As madeiras duras possuem taxa de crescimento inferior à das macias, originando peças de maior densidade e conseqüentemente maior resistência mecânica. Em função da boa durabilidade natural, são espécies que não dependem de tratamentos preservativos. Alguns exemplos de árvores folhosas nativas do Brasil são a sucupira (*Diploptropis spp*), o ipê (*Tabebuia serratifolia*) e a Peroba-do-Campo (*Paratecoma Peroba*). O eucalipto (*Eucalyptus spp*), árvore nativa da Austrália e extremamente adaptada ao clima do Sul e Sudeste brasileiro, também pertence à classe das dicotiledôneas [10].

A seção transversal de um tronco de uma árvore possui, de dentro para fora, as seguintes camadas: medula, cerne, albarno e casca. A Figura 2.1 ilustra a macroestrutura do tronco de uma árvore.

As madeiras com uso estrutural devem ser extraídas do albarno e do cerne. O albarno é composto por células vivas que transportam a seiva das raízes às folhas. Possui coloração mais

clara e é mais suscetível a ataques de fungos e insetos. No entanto, aceita tratamentos preservativos por impregnação com maior facilidade. Durante o crescimento da árvore, o albúrnio se transforma em cerne, convertendo as células vivas em células inativas. A principal função do cerne é sustentar e dar rigidez às árvores. Apesar das diferenças apresentadas entre as duas camadas do tronco, ambas possuem densidade e resistência mecânica semelhantes.

Figura 2.1 – Seção transversal de uma árvore.



(Fonte: próprio autor).

Nos países de clima temperado, as árvores produzem uma nova camada de madeira na primavera. Após esse período, a velocidade de crescimento diminui até estagnar no inverno. Esse processo cria os anéis anuais, visíveis a partir da formação de duas camadas de coloração diferente, sendo a mais clara originada na primavera e a mais escura no verão. Ao contar o número de anéis, é possível estimar a idade da árvore. Em países tropicais, as árvores possuem um crescimento homogêneo e constante durante o ano, resultando em anéis anuais menos perceptíveis.

Com relação à microestrutura, a madeira é composta por três elementos químicos, sendo 50% carbono (C), 44% oxigênio (O) e 6% hidrogênio (H). A combinação destes elementos forma três tipos de moléculas, que podem ser observadas em maior ou menor proporção em função da espécie da árvore [12]. Para as madeiras macias, encontra-se a seguinte distribuição:

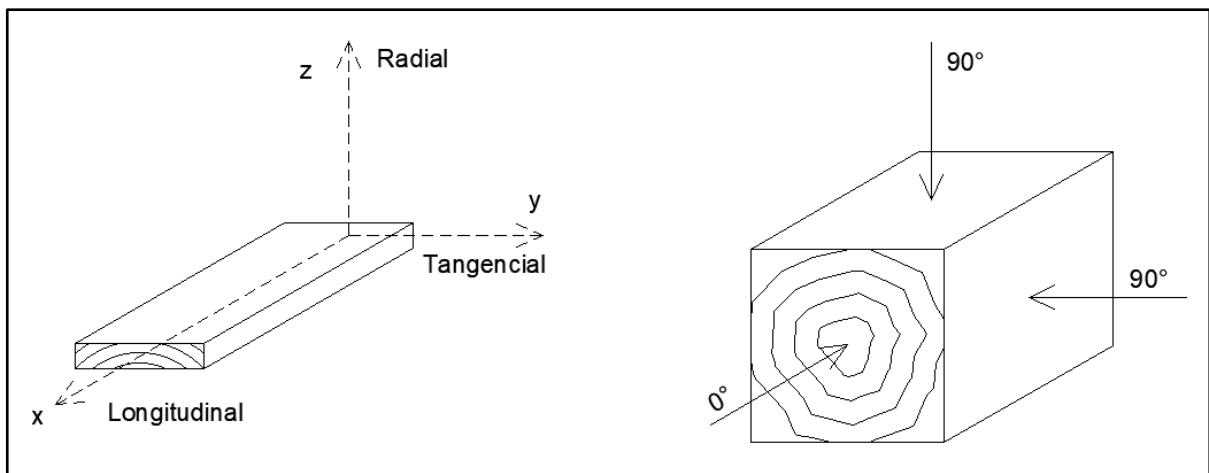
- 40% a 45% de moléculas de celulose;
- 25% a 30% de moléculas de hemicelulose;
- 25% a 35% de moléculas de lignina.

As moléculas de celulose formam as paredes das células tubulares, também denominadas como fibras, orientadas na direção axial do tronco e unidas pela hemicelulose e

pela lignina [11]. Em função da orientação das fibras, considera-se a madeira como um material ortótropo. Os três eixos perpendiculares que representam os planos ortogonais de simetria do material estão ilustrados na Figura 2.2.

O eixo longitudinal, também denominado de eixo paralelo às fibras, representa a direção de maior resistência e rigidez da madeira. Em contrapartida, os eixos radiais e tangenciais, conhecidos como eixos perpendiculares às fibras, representam as direções de menor resistência e rigidez do material e, usualmente, são considerados com as mesmas propriedades mecânicas [12].

Figura 2.2 - Eixos de simetria da madeira.



(Fonte: próprio autor).

A seguir, serão apresentadas as principais relações entre as propriedades mecânicas da madeira [11]. Observa-se que os valores das resistências e dos módulos de elasticidade estão em MPa e as densidades em kg/m^3 .

- Valor característico da resistência à tração paralela às fibras, $f_{t,0,k} = 0,6 f_{b,k}$;
- Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, $f_{c,0,k} = 5 (f_{b,k})^{0,45}$;
- Valor característico da resistência à tração perpendicular às fibras, o menor entre $f_{t,90,k} = 0,0015 \rho_k$ e $f_{t,90,k} = 0,6$;
- Valor característico da resistência à compressão perpendicular às fibras, $f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k$;
- Valor característico inferior (quinto percentil) do módulo de elasticidade à flexão paralela às fibras, $E_{0,05} = 0,67 E_{0,m}$;

- Valor médio do módulo de elasticidade à flexão perpendicular às fibras, $E_{90,m} = \frac{E_{0,m}}{30}$,
- Valor médio do módulo de elasticidade transversal, $G_m = \frac{E_{0,m}}{16}$;

Os principais valores de resistência e de elasticidade em função das classes de resistência estão indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classes de resistência.

Classes de Resistência		Madeira Macia											Madeira Dura						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Flexão Característica [MPa]	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tração Paralela Característica [MPa]	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tração Perpendicular Característica [MPa]	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão Paralela Característica [MPa]	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compressão Perpendicular Característica [MPa]	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,1	8,3	9,3	11,0	13,5
Cisalhamento Característico [MPa]	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Módulo de Elasticidade Paralelo Médio [GPa]	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	11	12	13	14	17	20
Módulo de Elasticidade Paralelo Característico [GPa]	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	11,0	9,2	10,0	11,0	12,0	14,0	16,8
Módulo de Elasticidade Perpendicular Médio	$E_{90,m}$	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,70	0,80	0,90	0,90	1,10	1,33
Módulo de Elasticidade Transversal Médio	G_m	0,40	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,80	0,80	0,90	0,90	1,00	0,70	0,80	0,80	0,90	1,10	1,25
Densidade Característica [kg/m ³]	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	540	560	620	700	900
Densidade Média [kg/m ³]	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	650	660	750	840	1080

(Fonte: NBR 7190 [13]).

A partir das propriedades mecânicas da madeira, extraídas da Tabela 2.2, observa-se que a razão $E_{0,m}/G_m$ é aproximadamente igual a 16. Em outros materiais, como por exemplo o aço, tal razão se aproxima de 2. Como resultado disso, os deslocamentos provenientes do cisalhamento, usualmente desconsiderados nas estruturas metálicas, tendem a ser relevantes no

dimensionamento das estruturas de madeira. Em determinadas situações, desprezar os efeitos do cisalhamento para o cálculo dos deslocamentos em peças de madeira pode representar uma diferença de 15% a 20% contra a segurança.

A madeira tem suas propriedades mecânicas afetadas pela duração do carregamento, pela temperatura e pela umidade relativa do ar, que influencia diretamente no teor de umidade do material. Observa-se que as propriedades indicadas na Tabela 2.2 foram obtidas a partir de ensaios com duração de aproximadamente 5 minutos, realizados a uma temperatura de 20 °C e a uma umidade relativa do ar de 65%, indicando um teor de umidade da madeira de 12% [12]. Portanto, as propriedades tabeladas devem ser corrigidas em função das condições ambientais e de uso enfrentadas pelas estruturas de madeira em cada projeto.

As normas de estruturas de madeira consideram a influência dos itens citados anteriormente a partir da utilização dos coeficientes de modificação de resistência e de rigidez, conhecidos como k_{mod} .

O coeficiente k_{mod1} leva em consideração a duração do carregamento aplicado nos elementos estruturais de madeira. Caso a ação seja permanente, ou seja, na hipótese de o carregamento permanecer por mais de dez anos sobre a estrutura, adota-se $k_{mod1} = 0,6$. Para carregamentos instantâneos de curtíssima duração, a norma brasileira permite um acréscimo de 10% nos valores de resistência da madeira.

Na elaboração de projetos de estruturas de madeira, a classe de carregamento de uma combinação de ações é definida pela duração acumulada prevista para a ação variável tomada como a ação variável principal dessa combinação [13].

Os valores do primeiro coeficiente de modificação em função da duração do carregamento podem ser extraídos da Tabela 2.3.

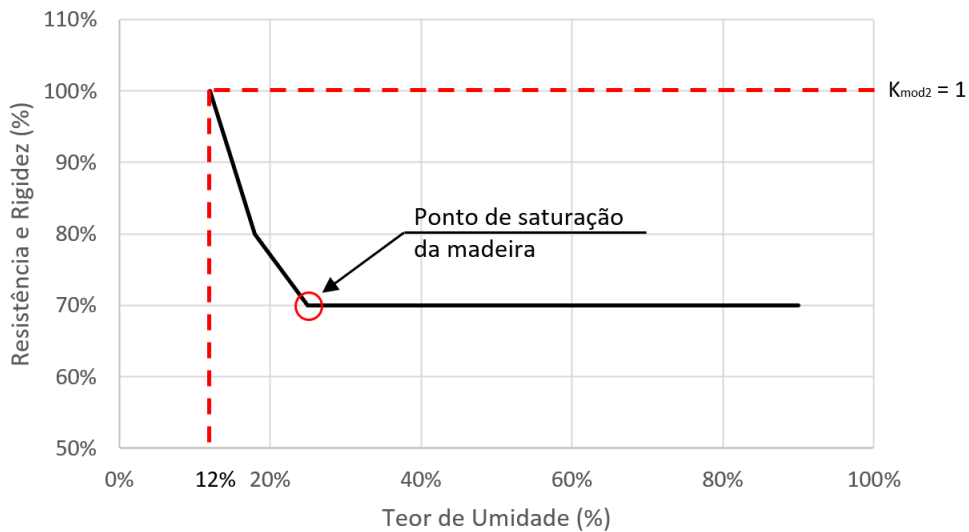
Tabela 2.3: Coeficiente de Modificação k_{mod1} .

Classe de Carregamento	Duração Acumulada	k_{mod1}
Permanente	Mais de 10 anos	0,6
Longa Duração	Entre 6 meses e 10 anos	0,7
Média Duração	Entre uma semana e 6 meses	0,8
Curta Duração	Menos de uma semana	0,9
Instantânea	Muito curta	1,1

(Fonte: NBR 7190 [13]).

Com relação à perda de resistência e de rigidez em função do teor de umidade presente no interior da madeira, utiliza-se o coeficiente de modificação k_{mod2} . Quanto menor for a umidade relativa do ambiente e consequentemente menor for o teor de umidade da madeira, maior será a resistência da peça. Para uma umidade relativa do ar acima do ponto de saturação da madeira, ou seja, $U_{amb} > 85\%$ e $U_{eq} > 25\%$ a 30% [9], os valores de resistência e de rigidez são constantes, conforme ilustrado pela Figura 2.3.

Figura 2.3 - Influência da umidade nas propriedades da madeira.



(Fonte: próprio autor).

O efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira usualmente é desprezado para valores normais, que variam entre -30 °C e 65 °C [12]. Entretanto, para temperaturas constantes acima dos 65 °C , a redução da resistência e da rigidez deve ser considerada no cálculo das estruturas.

O projeto de revisão da norma NBR 7190 [13] contempla o efeito da temperatura ambiente nas peças de madeira ao incluir o coeficiente de modificação k_{mod3} , associado ao fator de modificação C_t , com valores definidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Coeficientes C_t .

Propriedade	$T \leq 38\text{ °C}$	$38\text{ °C} < T \leq 52\text{ °C}$	$52\text{ °C} < T \leq 66\text{ °C}$
Tração paralela às fibras e módulo de elasticidade	1,0	0,9	0,9
Demais propriedades para $U_{eq} < 16\%$	1,0	0,8	0,7
Demais propriedades para $U_{eq} \geq 16\%$	1,0	0,7	0,5

(Fonte: NBR 7190 [13]).

Os esforços resistentes de cálculo de um elemento estrutural de madeira são dados por $R_d = (k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \times f_k) / \gamma$, com f_k e γ determinados em função do tipo de solicitação.

2.1.2 Produtos de madeira engenheirada

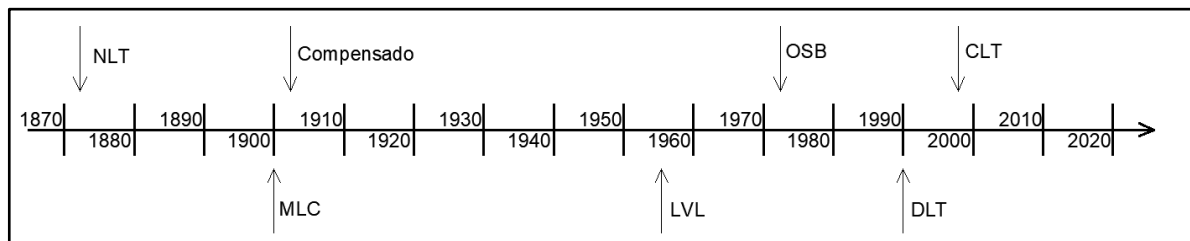
O processo de corte e desdobramento das árvores origina peças de madeira serrada com dimensões limitadas em função do diâmetro e do comprimento das toras de onde foram extraídas. No Brasil, as vigas de madeira serrada usualmente possuem dimensões máximas de 25 cm de largura, 30 cm altura e comprimento inferior a 6 metros [9], com exceção feita às peças especiais. As mesmas limitações de dimensões são observadas nos países europeus, com pequenas variações de seção transversal máxima e comprimento das peças [12].

No entanto, os projetos de engenharia de estruturas demandam dimensões superiores às fornecidas pelo mercado das madeiras serradas. Em função desta necessidade, as peças de madeira de menor dimensão passam por um processo de industrialização, transformando-as em produtos de madeira engenheirada ou de madeira massiva.

Os produtos de madeira engenheirada são fabricados a partir da união entre lascas, lâminas ou lamelas de madeira por meio da colagem sob pressão ou por meio de conectores metálicos ou de madeira, originando elementos estruturais de grandes dimensões. Isso permite a utilização de estruturas de madeira em construções de maior complexidade, com peças capazes de vencer grandes vãos e carregamentos.

Os produtos de madeira engenheirada, em sua grande maioria, são utilizados na construção civil há mais de um século, conforme pode ser observado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Linha do Tempo dos Produtos de Madeira Engenheirada.



(Fonte: adaptada de [12]).

O principal produto fabricado a partir de lascas de madeira é o *Oriented Strand Board* (OSB), muito utilizado nos países da América do Norte e da Europa para a construção de residências de *wood frame*. Os painéis são fabricados a partir da colagem sob pressão de lascas

de madeira, que são dispostas no sentido longitudinal nas duas últimas camadas e aleatoriamente nas demais.

Com relação à fabricação de produtos laminados, utiliza-se o processo de corte rotatório dos troncos das árvores, extraindo lâminas de madeira com espessuras variando entre 1 e 4 mm.

Na sequência, as lâminas passam por um processo de secagem, que pode ser natural ou artificial [9], para finalmente serem unidas por meio da colagem sob pressão. Os principais produtos fabricados a partir de lâminas são:

- O compensado ou *plywood*, produzido a partir da colagem de lâminas ortogonais entre si, originando painéis de uso estrutural;
- O *Laminated Veneer Lumber* (LVL), fabricado a partir da colagem de lâminas sobrepostas com mesma orientação, fornecendo elementos estruturais de barras utilizadas principalmente como vigas.

Os produtos de madeira engenheirada fabricados a partir de lamelas possuem um processo produtivo semelhante.

Inicialmente, as toras são desdobradas em lamelas, com espessuras variando entre 10 e 50 mm. Na sequência, as lamelas passam pelo processo de secagem em estufa, que garante um teor de umidade da madeira entre 6% e 15%. Após a etapa de secagem, as tábuas são classificadas visual e mecanicamente de acordo com as tabelas de classe de resistência apresentadas em normas internacionais [13; 14].

Posteriormente, as extremidades das lamelas são fresadas em formato de emendas dentadas [9] e unidas umas às outras no sentido do eixo longitudinal a partir da colagem das pontas, em um processo conhecido como união por *finger-joint*. Finalmente, as tábuas com comprimentos alongados são aplainadas, corrigindo eventuais imperfeições ou diferenças entre dimensões das lamelas adjacentes.

Após o processo descrito anteriormente, as lamelas são unidas por meio do uso de adesivos estruturais, pregos, parafusos ou cavilhas de madeira, originando os produtos de madeira engenheirada fabricados a partir de lamelas (Figura 2.5), com destaque para:

- A Madeira Lamelada Colada (MLC) ou *Glued Laminated Timber* (GLT), produzida a partir da colagem sob pressão de lamelas de madeira orientadas na

mesma direção, originando elementos estruturais lineares utilizados como vigas e pilares;

- O *Nail Laminated Timber* (NLT), produzido a partir da união entre tábuas de madeira pregadas entre si com mesma orientação das fibras, formando peças planas que são utilizadas como lajes;
- O *Dowel Laminated Timber* (DLT), semelhante ao NLT, porém com união entre as lamelas a partir de cavilhas de madeira;
- A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT), fabricada a partir da colagem sob pressão de lamelas em camadas ortogonais entre si, originando painéis utilizados como lajes ou paredes;
- A Madeira Lamelada Protendida (MLP), produzida a partir de lamelas de madeira orientadas na mesma direção e unidas por sistemas de protensão posicionados transversalmente ao eixo longitudinal das tábuas, formando elementos estruturais planos comumente utilizados como tabuleiros de pontes rodoviárias [15].

Figura 2.5 - Produtos de madeira massiva.



(Fonte: Structure Craft [16]).

Observa-se que nem todos os produtos de madeira engenheirada são considerados como produtos de madeira massiva. O código de obras norte americano [17] fornece dimensões mínimas para que um produto de madeira engenheirada possa ser utilizado em edificações de madeira massiva. No caso do CLT utilizado como laje, o código indica que os painéis devem possuir uma espessura mínima de 102 mm (4 polegadas) para serem considerados produtos de madeira massiva.

2.2 Sobre o CLT

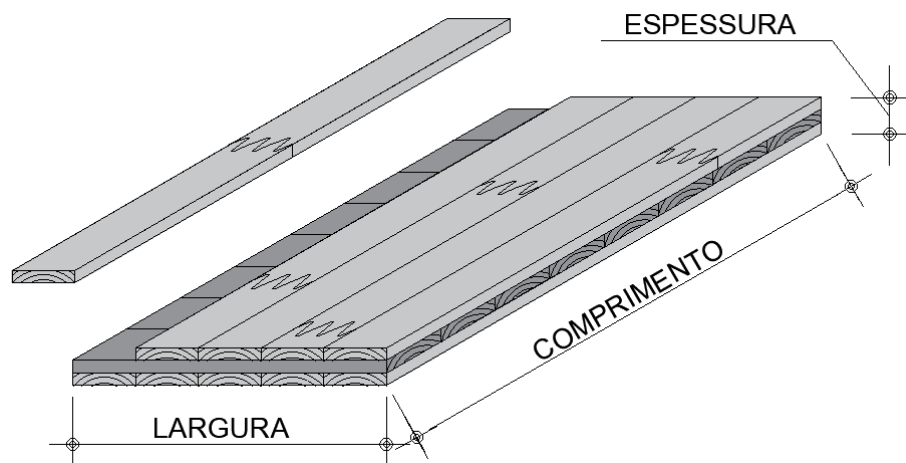
2.2.1 Produto

No ano de 1997, a *European Organisation for Technical Assessment* (EOTA), a partir da publicação do documento técnico *EAD 130005-00-0304 – Solid wood slab to be used as a structural element in buildings* [18], definiu o que seriam painéis de CLT, padronizando os métodos de produção e de avaliação das placas de madeira engenheirada.

Esse documento permitiu com que o produto, embora inovador, pudesse ser comercializado por todo o território europeu com a garantia de possuir as mesmas características e requisitos de desempenho, independentemente do fabricante que o produzisse.

O documento publicado pela EOTA descreve o CLT como um elemento sólido de madeira, fabricado a partir da colagem de lamelas de madeira de conífera posicionadas em camadas perpendiculares entre si (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Vista isométrica de um painel de CLT.



(Fonte: próprio autor).

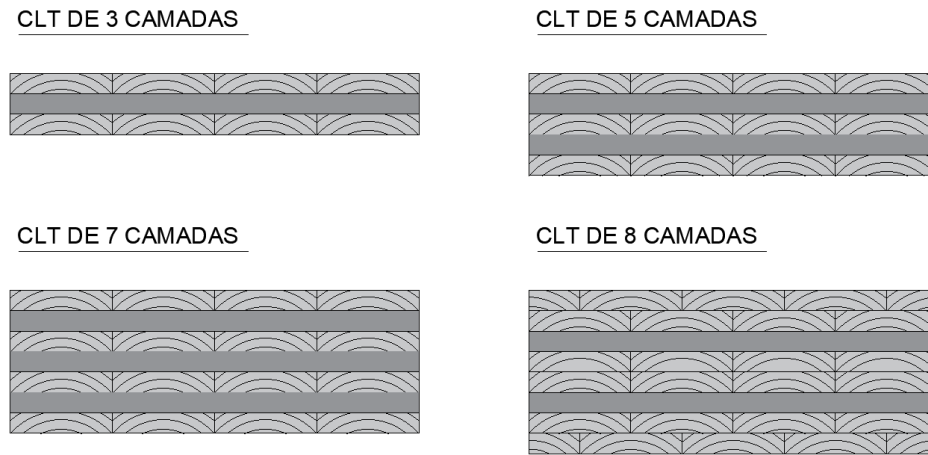
Usualmente a madeira utilizada na Europa é o abeto, mas também é permitido o uso madeiras de outras coníferas com características equivalentes.

Em função da composição do produto, que possui lamelas das camadas adjacentes em direções ortogonais, o CLT é capaz de distribuir os esforços em duas direções, a depender das condições de contorno da placa.

O documento europeu também define que os painéis devem possuir ao menos três camadas adjacentes, apesar de não limitar a quantidade máxima de lamelas sobrepostas.

Baseados nessas diretrizes, os fabricantes usualmente produzem painéis que possuem entre três e nove camadas sobrepostas, conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Seções transversais típicas dos painéis de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Os painéis podem ser fabricados com largura e comprimento variável em função das necessidades de cada projeto, embora existam limitações originadas pelo processo de produção, que prevê a utilização de prensas para a colagem das lamelas de madeira, e pelas dimensões máximas dos meios de transportes.

Uma das grandes vantagens em se utilizar o CLT é a possibilidade da realização das aberturas e furações nas lajes e paredes em ambiente fabril, necessárias para a passagem de instalações prediais e outros sistemas. A partir do projeto executivo de estruturas, os desenhos de produção (*shopdrawings*) são detalhados em softwares que exportam as informações para as máquinas de comando numérico, também conhecidas como CNCs (*Computerized Numerical Control*). A partir das informações geradas na etapa de projeto, as CNCs fresam os painéis, garantindo precisão e qualidade do produto.

2.2.2 Normas, legislação e código de obras

Nos últimos 20 anos, inúmeras normas técnicas e códigos internacionais têm sido criados e revisados com o objetivo de incluir o CLT em seus textos. Nas revisões, estão sendo estabelecidas as metodologias para cálculo e detalhamento de estruturas de CLT, as considerações para produção das placas de madeira massiva bem como as diretrizes dos códigos de obras regionais que legislam sobre o uso da madeira como elemento estrutural [19].

Com relação às normas de produção, controle de qualidade na fabricação e metodologia de ensaios dos painéis de CLT, destacam-se:

- A norma binacional *ANSI/APA PGR 320-2019: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber* [20], utilizada nos Estados Unidos e Canadá;
- A norma europeia, publicada em 2021, *EN 16351:2021: Timber structures – Cross laminated timber – Requirements* [21];
- A norma internacional *ISO 16696-1: 2019 - Timber structures – Cross laminated Timber – Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme* [22];
- O projeto de revisão da norma brasileira PN 02:126.10 ABNT NBR 7190:2021: *Projetos de Estrutura de madeira* [13].

No âmbito das normas de cálculo e detalhamento de projetos de estruturas de madeira, os países da América do Norte já possuem documentos de engenharia considerando os painéis de CLT. São eles: o *Canadian Standards Association (CSA) O86: 2019 – Engineering design in wood* [23], elaborado pelo *Canadian Wood Council (CWC)* e o *National Design Specification (NDS) for wood construction* [24], com última edição publicada pelo *American Wood Council (AWC)* no ano de 2018.

Na Europa, embora seja possível utilizar uma adaptação do método das seções compostas apresentado no Anexo B da publicação de 2004 do *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings* [25], ainda não existe uma diretriz normativa que apresente a metodologia de cálculo das peças de CLT. Entretanto, a próxima revisão da norma europeia, programada para 2022, incluirá os painéis de madeira massiva [2].

No Brasil, a revisão da NBR 7190 prevê acrescentar a metodologia de cálculo de estruturas de CLT apresentada no documento técnico *ProHolz Austria. Cross-laminated timber structural design – Basic design and engineering principles according to Eurocode* [26], produzido em 2014.

Sobre os códigos de obras e legislações dos corpos de bombeiros, o *International Code Council (ICC)*, associação dos Estados Unidos que desenvolve e elabora as regras para construção em todo o território do país, criou, em meados de 2016, o grupo intitulado *Code Council Ad Hoc Committee on Tall Wood Buildings* [27] com o intuito de estabelecer as principais diretrizes para construção de edifícios em altura com estruturas de madeira.

O comitê propôs revisões no *International Building Code (IBC)*, que foram aprovadas em 2019 e entraram em vigor em 2021. Figuram no texto, dentre outras alterações, a criação dos tipos de construção IV-A, IV-B e IV-C, além do reenquadramento do tipo IV-HC.

O grupo IV contempla construções com estruturas de madeira massiva, seja ela proveniente de peças de madeira serrada ou composta por produtos de madeira engenheirada com dimensões mínimas pré-estabelecidas a depender do uso e da altura do edifício [17].

No subgrupo IV-A, todas as peças de madeira obrigatoriamente devem ser revestidas com material não combustível resistente ao fogo com a finalidade de retardar a propagação de chamas e aumentar a resistência do elemento estrutural em situação de incêndio.

O tipo de construção IV-B permite que as estruturas de madeira sejam parcialmente revestidas com um material não combustível. Para o forro, que também inclui as vigas, é possível deixar a madeira exposta em até 20% da área do ambiente, enquanto para as paredes e pilares, o valor é limitado a 40% da mesma área [17].

Nas edificações IV-C, não são exigidos revestimentos para as estruturas de madeira.

Por fim, as edificações do tipo IV-HT (*heavy timber*) são compostas por elementos de madeira serrada com fachada revestida com material não combustível e resistente ao fogo.

A Tabela 2.5 resume as informações descritas na revisão do IBC para os principais tipos de ocupação.

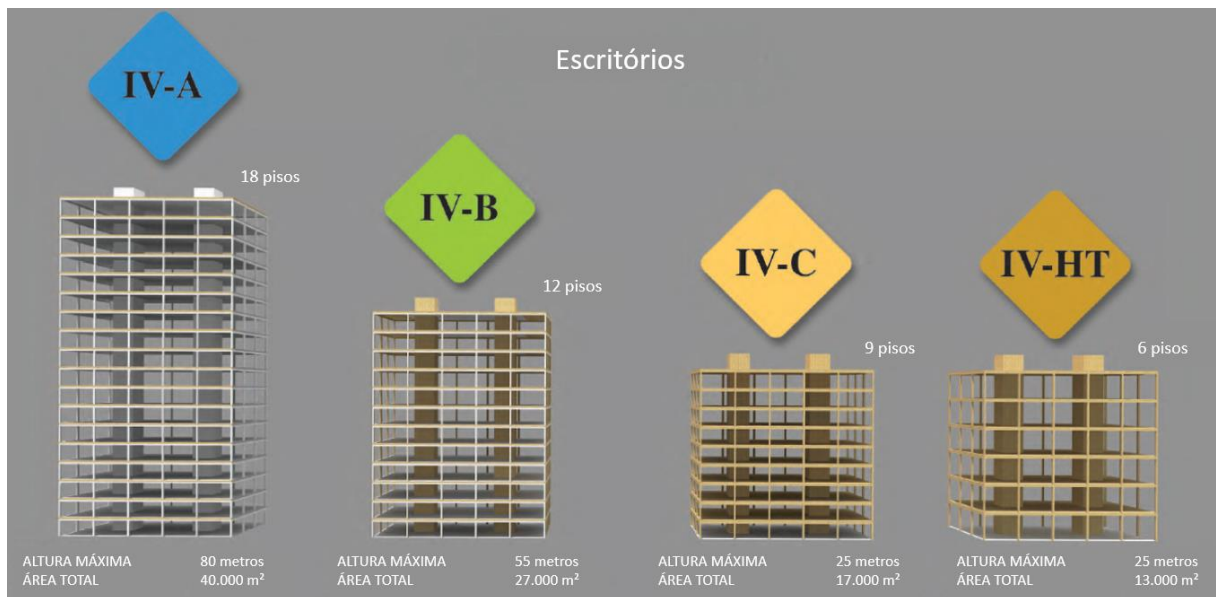
Tabela 2.5 – Limites de dimensões para as construções em madeira nos EUA.

Classe de Ocupação	Chuveiro Automático	IV-A			IV-B			IV-C			IV-HT		
		Altura (m)	Pisos	Área (m ²)	Altura (m)	Pisos	Área (m ²)	Altura (m)	Pisos	Área (m ²)	Altura (m)	Pisos	Área (m ²)
Escritórios	Sim	80	18	40.200	55	12	27.800	25	9	16.700	25	6	13.400
	Não	20	5	10.050	20	5	6.700	20	5	4.200	20	5	3.350
Escolas	Sim	82	9	28.450	55	6	19.000	25	4	11.850	25	4	9.500
	Não	20	3	7.100	20	3	4.750	20	3	2.950	20	3	2.350
Hotéis	Sim	80	18	22.900	55	12	15.250	25	5	9.550	25	5	7.600
	Não	20	4	5.700	20	4	3.800	20	4	2.400	20	4	1.900
Hospitais	Sim	20	10	13.400	20	6	8.900	20	4	4.450	20	4	4.450
Residencial	Sim	80	18	22.900	55	12	15.250	25	5	9.550	25	5	7.600
	Não	20	4	5.700	20	4	3.800	20	4	2.400	20	4	1.900

(Fonte: adaptada do IBC 2021 [17]).

Com base nos dados apresentados anteriormente, observa-se que, a partir de 2021, é permitida a construção de edifícios de até 18 pavimentos com estruturas de madeira nos Estados Unidos (Figura 2.8), contanto que a edificação seja equipada com chuveiros automáticos.

Figura 2.8 – Tipos de construção de madeira nos EUA.



(Fonte: adaptada do IBC 2021 [17]).

Além das limitações descritas na Tabela 2.5, o IBC prescreve outros itens obrigatórios para as estruturas de madeira, tais como o revestimento com materiais não combustíveis de todos os elementos nas rotas de fuga e o tempo mínimo de resistência ao fogo igual a 120 minutos para as estruturas dos tipos de construção IV-A, IV-B e IV-C, excetuando-se aqui os pórticos e paredes estruturais do tipo IV-A que devem resistir a 180 minutos de incêndio.

Adicionalmente, é possível enquadrar os edifícios de madeira nos tipos de construção V-A e V-B. Nesse caso, as exigências relacionadas à segurança contra incêndio são mais brandas às custas da diminuição das alturas e das áreas máximas permitidas para as edificações. De maneira geral, as construções de *wood frame* se enquadram nesses grupos.

No Canadá, o *National Building Code of Canada* (NBC) [28], elaborado pelo *National Research Council Canada* (NRC), permite dois tipos de edificações: as compostas por materiais não combustíveis e as projetadas com materiais combustíveis. O primeiro grupo compreende as estruturas de concreto e de aço, enquanto no segundo grupo, se enquadram as construções com madeira massiva, denominadas de *heavy timber constructions*, e as construções de *light wood frame*.

As estruturas de madeira massiva são proibidas em edificações onde o tempo mínimo de resistência ao fogo exigido supera 45 minutos. Observa-se ainda que a regulamentação canadense prescreve dimensões mínimas para as seções transversais das peças de madeira [28], dependendo do tipo de elemento estrutural.

O código de obras da província de Ontário [29] permite edificações com estruturas em material combustível de até 6 pavimentos sobre o térreo, equivalente a 18 metros de altura, e área máxima de 3.000 m², contanto que o edifício seja equipado com chuveiros automáticos. Porém, a regulamentação exige um tempo mínimo de resistência ao fogo igual a 60 minutos, impedindo, portanto, o uso de estruturas de madeira massiva nesta tipologia.

A madeira somente passa a figurar no NBC nos edifícios com no máximo 3 pavimentos de altura e área variando entre 2.400 m² e 3.600 m², dependendo do número de ruas de acesso à construção. Para obras com mais de duas ruas de acesso, a área máxima pode ser atingida. Nessa tipologia, a utilização de chuveiros automáticos não se faz necessária.

Destaca-se que grande parte das estruturas de madeira dos telhados das edificações elencadas pelo código de obras do Canadá necessita de tratamento por impregnação com produtos retardantes de chama.

Recentemente, o NRC propôs incluir no texto do NBC as Construções em Madeira Massiva Revestida, ou *Encapsulated Mass Timber Construction* (EMTC), permitindo a utilização de madeira massiva totalmente revestida com material não combustível em edifícios de até 12 pavimentos, equivalente a 42 metros de altura, área máxima de 7200 m² e equipados com chuveiros automáticos [28].

Na Europa, apesar das normas de engenharia serem harmonizadas entre todos os países do continente, os códigos de obra que regulam a utilização dos diferentes tipos de materiais nas construções são regionais [30].

Dentre os países que possuem regras específicas sobre o uso de madeira nas construções, pode-se destacar a Suíça, a Itália, a Suécia e a Alemanha.

Na Suíça, a regulamentação vigente permite o uso de materiais combustíveis em todas as categorias de edificações, apenas limitando a exposição dos elementos de madeira nas rotas de fuga e em edifícios com altura superior a 30 metros, que devem ser totalmente encapsulados [30].

As regras da brigada de incêndio da Itália permitem a construção de edifícios de até 24 metros de altura sem nenhuma restrição relacionada ao uso de materiais combustíveis [30]. A partir dessa dimensão, é necessária uma aprovação especial do corpo de bombeiros local, que emitirá um certificado atestando a segurança do imóvel em situação de incêndio.

No código de obras da Suécia, elaborado pelo *Swedish National Board for Housing, Building and Planning*, a permissão para utilização dos materiais estruturais tem por base o desempenho dos mesmos. Portanto, caso a estrutura atenda aos requisitos mínimos de resistência ao fogo e compartimentação em situação de incêndio, o material que a compõe pode ser utilizado no projeto.

Observa-se apenas que as regras simplificadas de dimensionamento das estruturas em situação de incêndio podem ser adotadas em construções de no máximo 16 pisos, devendo ser substituídas por uma análise mais aprofundada nos edifícios com maior altura.

Contrapondo o país nórdico, a Alemanha possui legislação com base em regras prescritivas para as construções locais. Edifícios com estruturas de madeira projetados com até 13 metros de altura são permitidos, desde que totalmente encapsulados. Para tanto, são necessárias rotas de fuga adicionais além do uso de chuveiros automáticos em caso de estruturas de madeira não encapsulada [30].

No Brasil, as Instruções Técnicas elaboradas pelos Corpos de Bombeiros estaduais estabelecem as diretrizes para segurança das edificações em situação de incêndio. Dentre os documentos, destacam-se a Instrução Técnica nº 08/2019 (IT08) - Segurança estrutural contra incêndio [31] e a Instrução Técnica nº 10/2019 (IT10) – Controle de materiais de acabamentos e de revestimentos [32].

A IT08 apresenta as condições mínimas a serem atendidas pelas estruturas e pelos elementos de compartimentação em situação de incêndio. A instrução pontua que, caso o material estrutural não possua norma nacional, podem ser utilizadas metodologias de cálculo de elementos estruturais em situação de incêndio descritas nos Eurocódigos ou em normas internacionalmente reconhecidas.

Também há a possibilidade de se comprovar o desempenho do elemento estrutural a partir da realização de ensaios de acordo com a ABNT NBR 5628: Componentes construtivos estruturais –Determinação da resistência ao fogo [33].

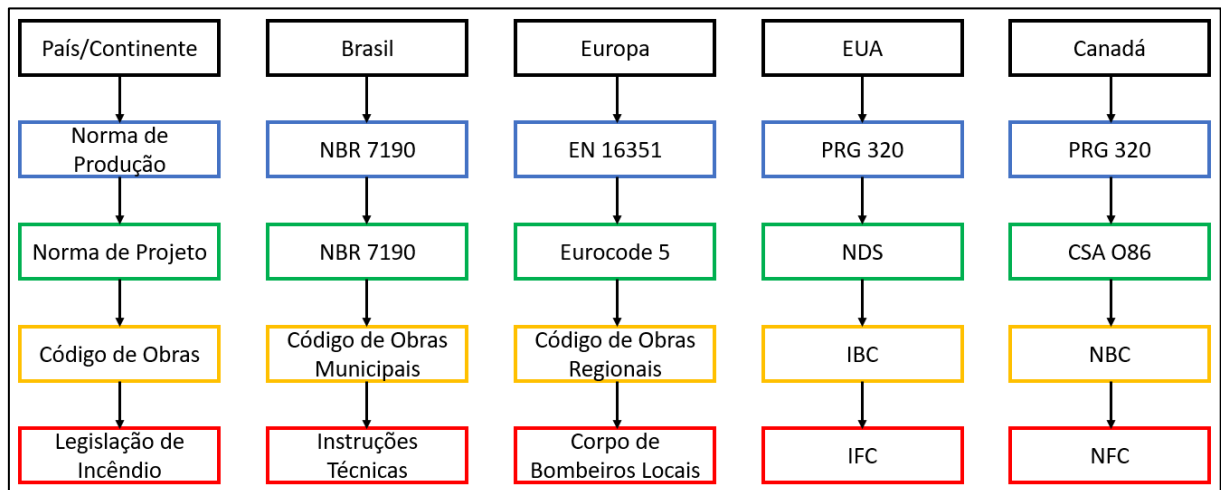
Por sua vez, a IT10 apresenta as características mínimas exigidas para os materiais de acabamentos e revestimentos, conseqüentemente limitando a propagação de chamas e o desenvolvimento de fumaça em um edifício em situação de incêndio.

Em 2020, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo criou um comitê denominado de “Grupo de Estudos da Segurança Contra Incêndio nas Edificações em Madeira”. O grupo é

formado por integrantes do Corpo de Bombeiros, pesquisadores e profissionais da área da construção em madeira. O objetivo é discutir a segurança das edificações de madeira em situação de incêndio com o intuito de elaborar um expediente normativo que será disponibilizado pelo Corpo de Bombeiros regulamentando o setor.

Na Figura 2.9 é possível observar um mapa normativo que resume este item do trabalho.

Figura 2.9 – Mapa normativo.



(Fonte: próprio autor).

2.2.3 Métodos de cálculo de painéis de CLT à temperatura ambiente

Desde a criação das placas de CLT, inúmeras teorias estruturais têm sido utilizadas para o cálculo da capacidade resistente e da rigidez dos painéis. Existem métodos com base em teorias estruturais, métodos empíricos e métodos que misturam as teorias estruturais com resultados obtidos por meio da realização de ensaios experimentais [34].

Usualmente, os métodos com base em teorias estruturais aferidos por ensaios representam uma solução mais interessante para a engenharia, uma vez que os calculistas de estrutura podem extrapolar o método para as especificidades de cada projeto.

Considerando que na maioria das situações o CLT é adotado na forma de lajes unidirecionais (Figura 2.10), comumente são utilizadas teorias estruturais de barra para descrever o comportamento dos painéis. Dentre elas, destacam-se a teoria de barras de *Bernoulli-Euler* e a teoria de barras de *Timoshenko*.

A cinemática proposta por *Bernoulli-Euler* considera que as seções transversais planas permanecem planas e ortogonais ao eixo deformado. Como resultado disso, tanto as distorções quanto às tensões de cisalhamento são nulas. Considerando que os deslocamentos originados

pelo cisalhamento são relevantes em estruturas de madeira, a adoção da teoria de barras de *Bernoulli-Euler* para o cálculo de painéis de CLT pode originar resultados inconsistentes.

A teoria de barras proposta por *Timoshenko* parte do mesmo princípio de *Bernoulli-Euler*. Considera-se, inicialmente, que as seções planas permanecem planas conforme ocorre a deformação ao longo do eixo da barra, como a rotação de um corpo rígido. Entretanto, a seção transversal das barras de *Timoshenko* não permanece ortogonal ao eixo longitudinal. A partir dessa consideração, é possível encontrar, além de deslocamento advindos dos momentos fletores, deslocamentos provenientes do esforço cortante. Portanto, a teoria de barras de *Timoshenko* tende a apresentar resultados mais consistentes para os painéis de CLT.

Em algumas situações em que as placas de CLT possuem comportamento bidirecional (Figura 2.11), é necessário utilizar teorias de placa para a análise dos painéis. A teoria de placas de *Reissner-Mindlin* equivale à teoria de barras de *Timoshenko* para elementos planos. Ou seja, o campo cinemático desses elementos considera os efeitos do cisalhamento para a determinação dos deslocamentos. Portanto, placas bidirecionais são calculadas a partir dessa teoria.

Figura 2.10 – CLT unidirecional.



(Fonte: próprio autor).

Figura 2.11 – CLT bidirecional.



(Fonte: próprio autor).

Conforme apresentado no item anterior, os europeus utilizam uma adaptação do método das seções compostas, também conhecido como Método Gama, para dimensionar os painéis de CLT.

O Método Gama representa um modo aproximado de calcular o efeito dos deslocamentos por cisalhamento das lamelas transversais do CLT a partir do modelo de barras de *Bernoulli-Euler*. Nesse método, a inércia das barras longitudinais é reduzida por meio do coeficiente γ e a inércia das barras transversais é desprezada.

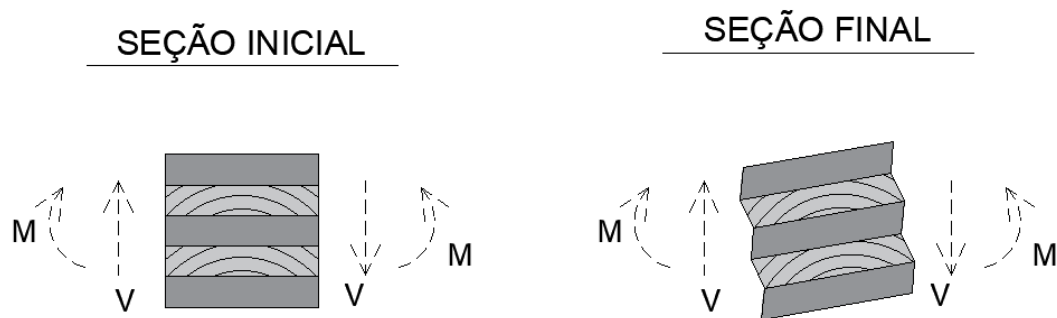
Inicialmente, o método foi proposto para a análise de vigas de madeira de seção composta, em que a perda de rigidez das conexões entre peças oriundas do efeito do

deslizamento dos conectores é levada em consideração para o cálculo da rigidez do elemento. Posteriormente, o método foi adaptado para análise de painéis de CLT.

A rigidez da conexão entre as lamelas longitudinais adjacentes é dada pela rigidez à torção da lamela transversal. Considerando as propriedades mecânicas da madeira, observa-se que a rigidez à torção está relacionada ao módulo de elasticidade G_{90} , que possui o menor valor entre os módulos transversais.

Quando a madeira é submetida a esforços de torção, a seção transversal da peça tende a rolar radialmente, em um fenômeno conhecido como *rolling-shear* (Figura 2.12).

Figura 2.12 – Representação do comportamento do CLT flexionado.



(Fonte: próprio autor).

O Método Gama considera a perda de rigidez da união entre as lamelas longitudinais e transversais a partir das Equações 1 a 4. A Figura 2.13 ilustra a geometria do painel.

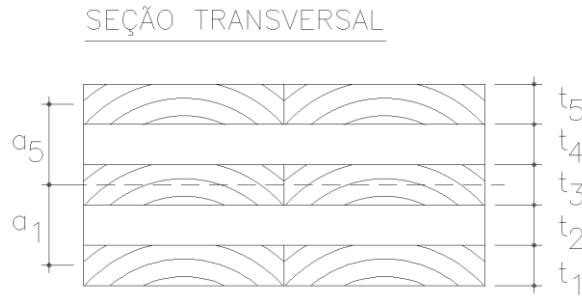
$$I_{ef} = \sum \left(\frac{bt_i^3}{12} + \gamma_i bt_i a_i^2 \right) \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 E_{0,m} t_1 t_4}{L^2 G_{90}} \right)} \quad (2)$$

$$\gamma_3 = 1 \quad (3)$$

$$\gamma_5 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 E_{0,m} t_5 t_2}{L^2 G_{90}} \right)} \quad (4)$$

Figura 2.13 – Geometria para Método Gama.



(Fonte: adaptada de Proholz Austria [26]).

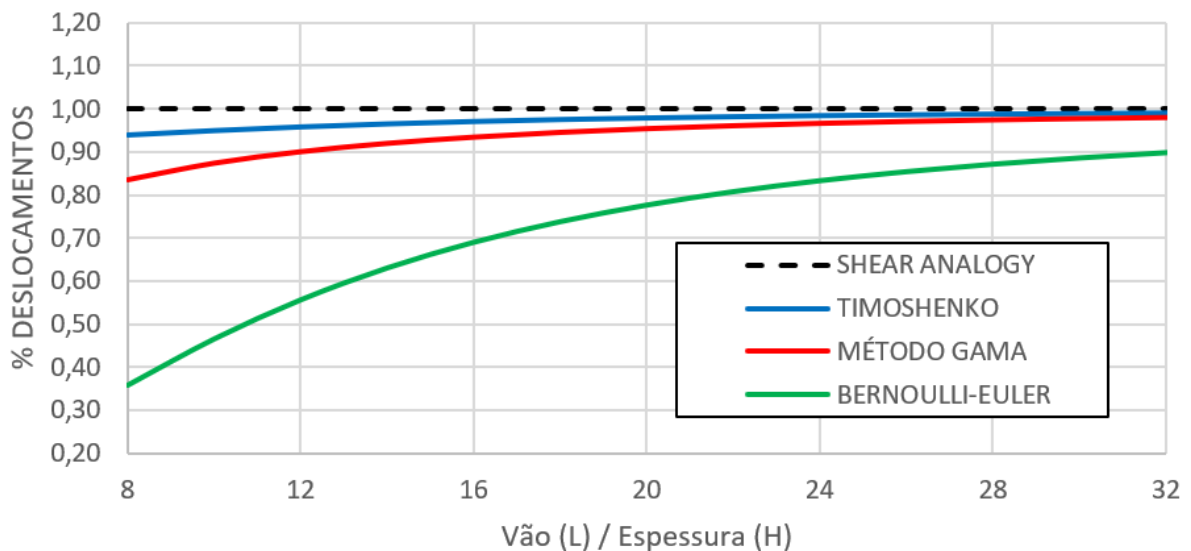
É importante destacar que, apesar do Método Gama considerar o efeito do cisalhamento das lamelas transversais, o cisalhamento das tábuas longitudinais é desprezado.

Outro método amplamente utilizado é o Método *Shear Analogy*, também conhecido como Método de *Kreuzinger*. As normas de projeto norte americanas consideram essa metodologia para o cálculo dos painéis de CLT.

De acordo com o *Canadian CLT Handbook* [34], esse método considera os deslocamentos causados pelo cisalhamento tanto das lamelas transversais quanto das lamelas longitudinais e, portanto, é considerado o método mais preciso para a determinação da rigidez de painéis de CLT.

Na Figura 2.14 é possível observar um gráfico que contém um comparativo entre os deslocamentos adimensionais máximos determinados a partir dos principais métodos de cálculo de painéis de CLT biapoiados, considerando um carregamento distribuído em toda área.

Figura 2.14 – Comparativo entre os principais métodos de cálculo de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Os deslocamentos obtidos por meio do Método *Shear Analogy* são considerados como os valores alvo. Para o cálculo por intermédio de *Bernoulli-Euler* e *Timoshenko*, a rigidez das lamelas transversais foi desprezada.

A partir da Figura 2.14, é possível notar que quanto mais flexível for a laje, menor é o efeito do cisalhamento na análise dos deslocamentos. No caso de painéis mais rígidos, a teoria de *Bernoulli-Euler* não representa a realidade.

Nota-se também que, apesar do Método *Shear Analogy* resultar em valores de deslocamento mais próximos dos reais, o Método Gama possui uma convergência rápida para a resposta esperada, especialmente considerando a razão típica entre o vão e a espessura de lajes de CLT ($30 < L/H < 40$).

2.3 Comportamento da Madeira em Situação de Incêndio

2.3.1 Carbonização

Quando submetida a elevadas temperaturas, a madeira inicia o processo de degradação térmica, liberando gases voláteis e calor a partir da ruptura das ligações de suas moléculas orgânicas. Como resíduo desse processo, é formada uma camada de carvão na superfície da madeira exposta ao fogo.

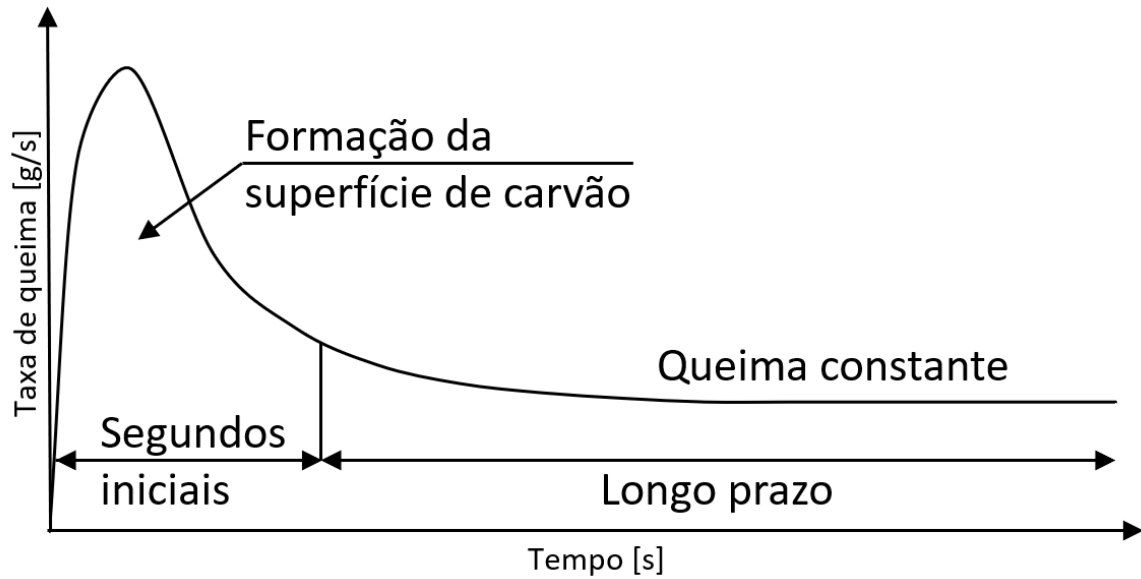
A degradação térmica pode ocorrer por combustão, quando há oxigênio, ou por pirólise, na ausência deste elemento.

As moléculas que compõem a madeira possuem diferentes temperaturas de deterioração. A celulose inicia tal processo para temperaturas entre 240 e 350 °C. As moléculas de hemicelulose iniciam a pirólise a partir de valores entre 200 e 260 °C. Por fim, a lignina se degrada para temperaturas variando entre 280 e 500 °C [35].

Considerando a microestrutura molecular da maioria das coníferas utilizadas na construção civil, o *Eurocode 5* [36] adota a isoterma de 300 °C como valor de referência para o início da carbonização da madeira.

A camada de carvão trabalha como isolante térmico, protegendo o interior da peça ainda não degradado. Como resultado, observa-se que, a partir da formação da superfície carbonizada, a taxa de queima medida em *g/s*, possui um comportamento linear e constante ao longo do tempo, conforme ilustrado pela Figura 2.15.

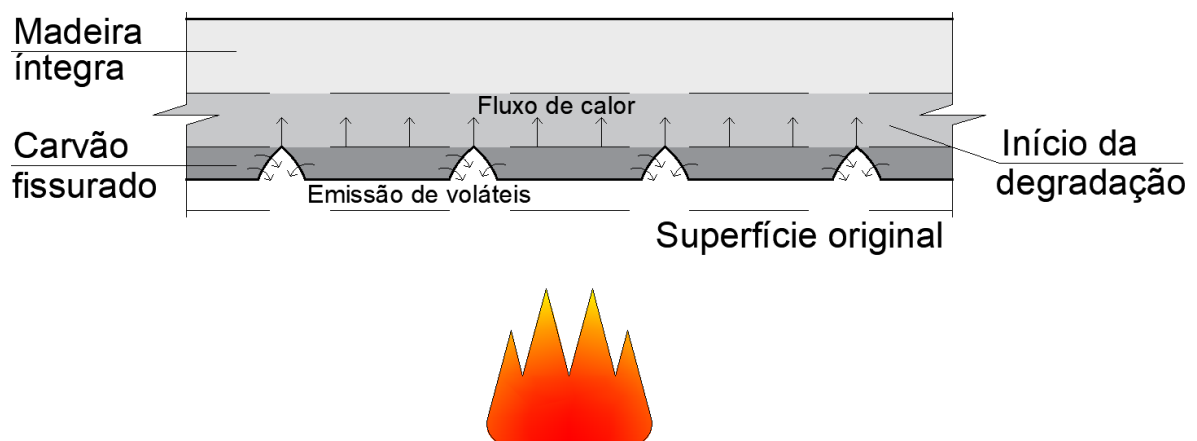
Figura 2.15 – Taxa de queima da madeira.



(Fonte: adaptada de Drysdale [35]).

O processo de degradação térmica evolui a partir do surgimento de fissuras na camada de carvão, que se intensificam para temperaturas na ordem dos 500 °C. Com o aumento das aberturas, o interior da madeira, anteriormente protegido, passa a ser consumido, liberando gases voláteis e formando uma nova camada carbonizada. Enquanto a madeira estiver submetida a uma fonte de calor constante, o processo se repete até o consumo total do elemento. O *Eurocode 5* indica que o carvão é totalmente consumido para temperaturas próximas dos 1000 °C. Na Figura 2.16 é possível observar o fenômeno completo.

Figura 2.16 – Processo de degradação térmica da madeira.



(Fonte: adaptada de Drysdale [35]).

Com o intuito de simplificar a análise das estruturas de madeira em situação de incêndio, o *Eurocode 5* [36] sugere a utilização de outra grandeza, conhecida como taxa de carbonização β_0 , medida em *mm/min*.

Tal constante relaciona o aumento da camada de carvão com o tempo de exposição do elemento estrutural a elevadas temperaturas. Dessa maneira, conhecidos o tempo t de fogo e o valor da constante β_0 , é possível calcular a seção residual da peça de madeira após o incêndio.

Destaca-se que essa metodologia é válida apenas para o programa térmico representado pela curva de incêndio-padrão descrita na norma ISO 834 [37], conforme será detalhado no item 2.4.3.

O *Eurocode 5* [36] nomeia de método da seção transversal reduzida o processo simplificado para determinação da seção remanescente de madeira após um incêndio. O processo de cálculo segue a Equação 5:

$$d_{ef} = \beta_0 t + k_0 d_0 \quad (5)$$

Sendo: d_{ef} a espessura de madeira degradada, β_0 a taxa de carbonização, t o tempo de incêndio, k_0 o coeficiente que leva em consideração a duração do incêndio e d_0 espessura da camada onde é assumido que a resistência e a rigidez da madeira são nulas. As taxas de carbonização podem ser extraídas da Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Taxas de carbonização da madeira.

Material	β_0 [mm/min]
Madeira macia	
Madeira Lamelada Colada com densidade característica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Madeira Maciça com densidade característica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Painéis	
Painéis de Madeira	0,9
Compensado	1,0
Outros painéis de madeira além do compensado	0,9

(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36])

2.3.2 Perda de resistência e elasticidade em função da temperatura

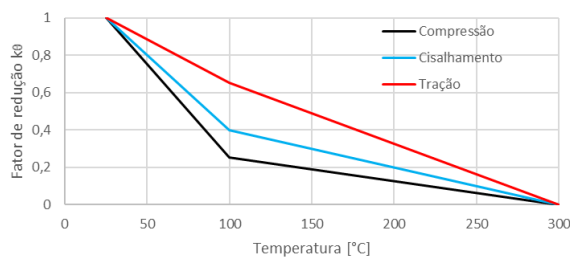
A partir da Equação 5, observa-se que, além da redução de seção transversal ocasionada pela carbonização do material, deve ser levada em consideração a diminuição da resistência e da rigidez da madeira para temperaturas entre 60 e 300 °C.

Em ensaios realizados em elementos de madeira expostos ao fogo, Wiesner, Bisby *et al.* [38] indicam uma diminuição das propriedades mecânicas do material a partir dos 60 °C, que se acentua aos 100 °C.

Corroborando as informações do parágrafo anterior, ensaios de termorretificação realizados por Silva [39] em peças estruturais de *pinus taeda* indicaram uma diminuição das propriedades de resistência (à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento paralelo às fibras) da madeira para temperaturas variando entre 160 e 260 °C. Em contrapartida, o mesmo autor indicou que as propriedades de rigidez, em especial o módulo de elasticidade à compressão, aumentaram ao longo do tratamento térmico.

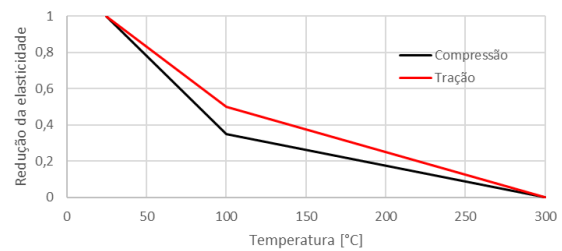
O *Eurocode 5* [36] apresenta a perda de resistência e de rigidez de madeira em forma gráfica, conforme ilustrado pelas Figuras 2.17 e 2.18.

Figura 2.17 – Redução da resistência.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [10]).

Figura 2.18 – Redução da rigidez.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [10]).

O método da seção reduzida contempla esse aspecto do problema, ao subtrair da seção transversal residual um valor adicional, denominado de camada de resistência nula. Para um tempo de exposição ao fogo superior a 20 minutos, essa camada possui espessura de 7 mm, que se mantém constante por tempo indeterminado. O método da seção reduzida é ilustrado por completo na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Método da seção reduzida.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36]).

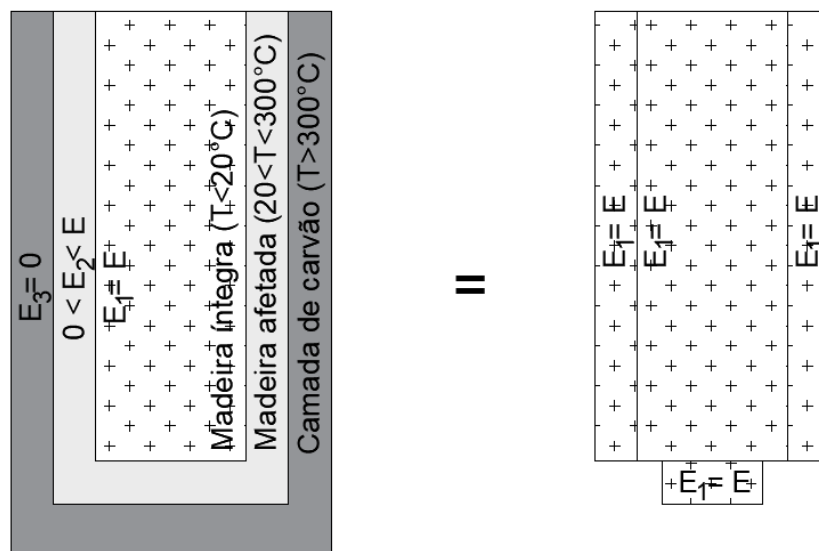
Nos últimos anos, pesquisas têm demonstrado que o valor de $d_0 = 7\text{mm}$ representa riscos à segurança das estruturas de madeira em situação de incêndio [38; 40; 41; 42].

Observa-se que, para inclusão do método da seção reduzida no *Eurocode 5*, foram utilizados os resultados de pesquisas realizadas por Schaffer [43]. O pesquisador realizou ensaios de flexão em vigas de MLC com três superfícies expostas ao fogo, submetidas a 30 e 60 minutos de incêndio-padrão. A partir dos ensaios, foi possível observar que a seção transversal das vigas de MLC pós incêndio poderia se dividir em três partes, sendo:

- i. Área totalmente carbonizada, onde a resistência e a rigidez da madeira devem ser desprezadas;
- ii. Área parcialmente afetada pela temperatura, onde a resistência e a rigidez devem ser minoradas;
- iii. Área de madeira não afetada pela temperatura.

Para simplificar a análise, Schaffer [43] propôs substituir a área parcialmente afetada pela temperatura por uma área inferior totalmente carbonizada, onde seriam desprezados os valores de resistência e de rigidez, de sorte que a rigidez da viga de MLC se manteria. A substituição de áreas proposta por Schaffer [43] pode ser observada na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Substituição de áreas.



(Fonte: adaptada de [41]).

Os ensaios de Schaffer [43] indicaram uma espessura de 40,0 mm de madeira parcialmente afetada pela temperatura, equivalentes a 7,6 mm de espessura de madeira com

resistência e rigidez nula. As normas atuais se basearam nesses ensaios ao considerar $d_0 = 7,0 \text{ mm}$.

Pesquisas relataram que a espessura da camada de resistência nula varia conforme o modo de ruptura do elemento estrutural [41]. Em elementos comprimidos, tais como os pilares, utilizar o valor estabelecido por Schaffer [43] tende a ser contra a segurança. Schmid, Klippel *et al.* [42] consideram utilizar o dobro de d_0 nessas situações.

Ensaio realizados em peças de madeira submetidas à flexão [40; 42] também demonstraram que o valor de 7,0 mm para camada de resistência nula pode ser contra a segurança. As mesmas pesquisas concluíram que apenas para elementos estruturais tracionados o valor atual de d_0 é adequado. A próxima revisão do *Eurocode 5* corrigirá esta falha no método da seção reduzida [44].

2.3.3 Propriedades térmicas da madeira

Além das propriedades mecânicas citadas anteriormente, outras propriedades físicas da madeira são afetadas pela temperatura. Em determinados tipos de análise, como por exemplo simulações computacionais utilizando softwares de elementos finitos, é imprescindível conhecer a variação de tais propriedades para a correta modelagem.

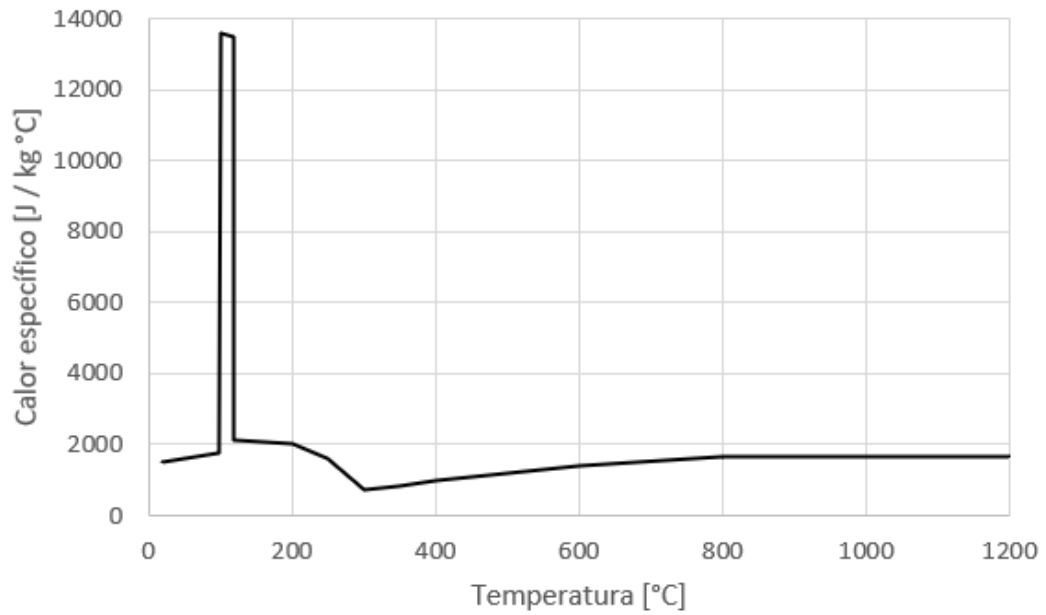
As Tabelas 2.7 e 2.8 e as Figuras 2.21, 2.22 e 2.23 ilustram a variação das principais propriedades térmicas de madeiras provenientes de coníferas expostas a um incêndio-padrão.

Tabela 2.7: Calor específico da madeira.

Temperatura [°C]	Calor Específico [J/Kg °C]
20	1530
99	1770
100	13600
119	13500
120	2120
200	2000
250	1620
300	710
350	850
400	1000
600	1400
800	1650
1200	1650

(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36]).

Figura 2.21 – Calor específico da madeira.



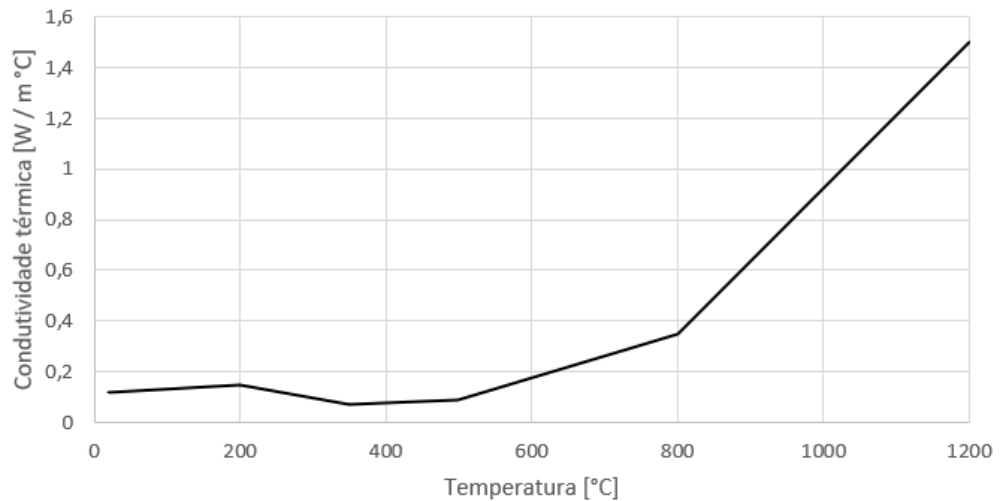
(Fonte: adaptado do *Eurocode 5* [36]).

Tabela 2.8: Condutividade térmica da madeira.

Temperatura [°C]	Condutividade Térmica [W/m °C]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

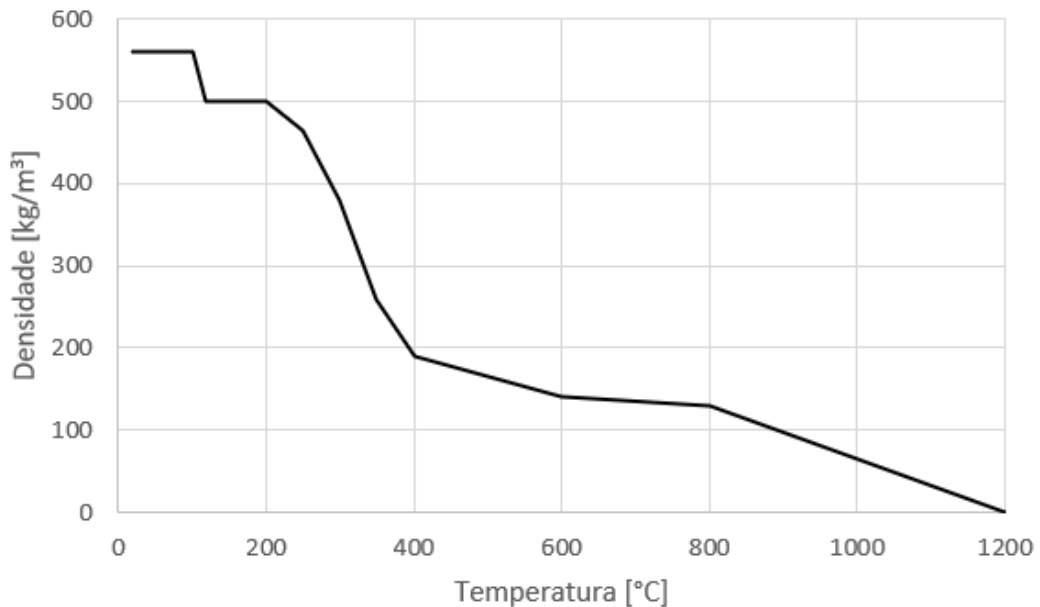
Fonte: (adaptada do *Eurocode 5* [36]).

Figura 2.22 – Condutividade térmica da madeira.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36]).

Figura 2.23 – Variação da densidade da madeira a partir de $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ e $U_{eq} = 12\%$.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36]).

2.3.4 Madeira revestida com material contra fogo

O *Eurocode 5* [36] permite o uso de estruturas de madeira revestidas com materiais contra fogo, tais como chapas de gesso acartonado e capas de sacrifício de madeira não estrutural.

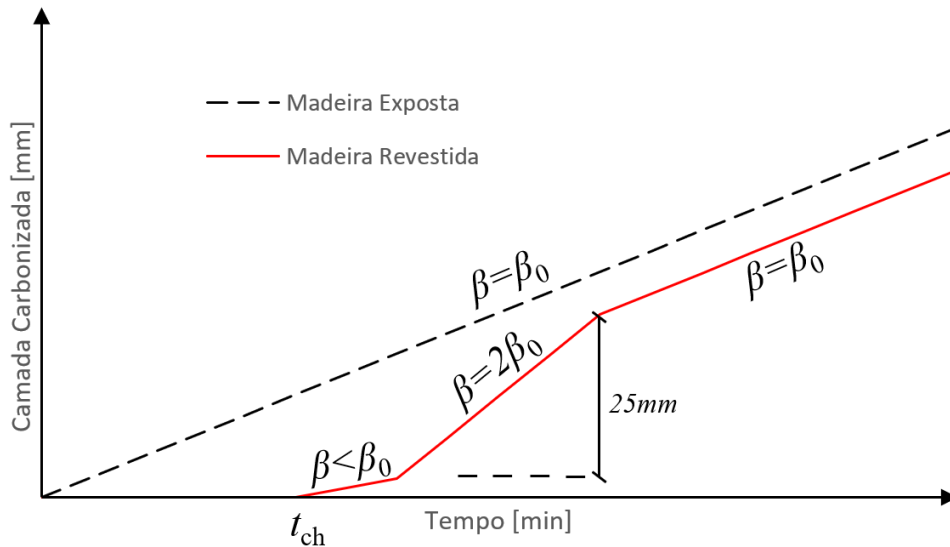
Para tanto, devem ser observadas as seguintes questões: a) o tempo de início da carbonização da madeira (t_{ch}) é retardado de acordo com o revestimento; b) a carbonização é iniciada antes da falha do revestimento, no entanto a uma taxa β reduzida; c) após a falha do revestimento, a carbonização ocorre a uma taxa β superior à tabelada, usualmente adota-se o dobro do valor; d) após 25 mm de queima, a taxa de carbonização retorna ao padrão tabelado.

O principal motivo para o aumento da taxa de carbonização observado após a falha do revestimento contra fogo é que, a partir desse instante, a madeira, que estava isolada termicamente, passa a combater uma temperatura elevada sem nenhuma camada protetora de carvão [45]. As considerações descritas anteriormente podem ser observadas na Figura 2.24.

O projeto de estruturas de madeira deve ser detalhado de modo a preservar a funcionalidade do material de revestimento durante o tempo de resistência ao fogo para o qual o revestimento foi projetado. Portanto, é necessária uma atenção especial aos desenhos de fixações, às aberturas, às juntas, à passagem de instalações prediais, entre outros. O *Eurocode*

5, por exemplo, observa que a os parafusos que conectam as placas de gesso acartonado às peças de madeira devem ancorar no mínimo 10 mm a partir da camada de carvão.

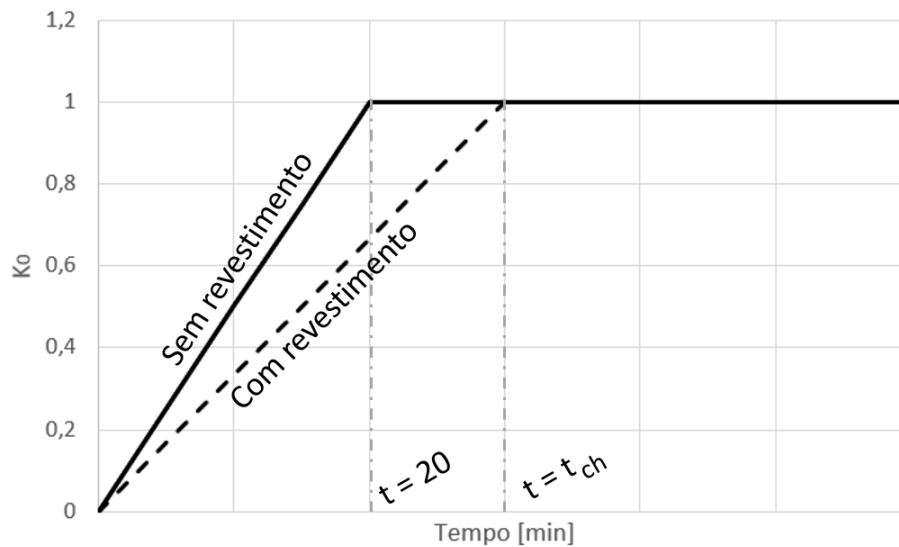
Figura 2.24 – Carbonização de madeira exposta ao fogo e com revestimento resistente ao fogo.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [36]).

A camada de resistência nula também é afetada pela presença de um revestimento sobre a madeira. O *Eurocode 5* indica reduzir o valor de k_0 em função do tempo necessário para o início da carbonização da madeira revestida, conforme ilustrado pela Figura 2.25. A proposta de revisão da norma europeia [44] prevê alterar a curva de modo que k_0 seja unitário em $t = 0,7t_{ch}$.

Figura 2.25 – Coeficiente k_0 para madeira revestida.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [44]).

2.4 Sobre o CLT em Situação de Incêndio

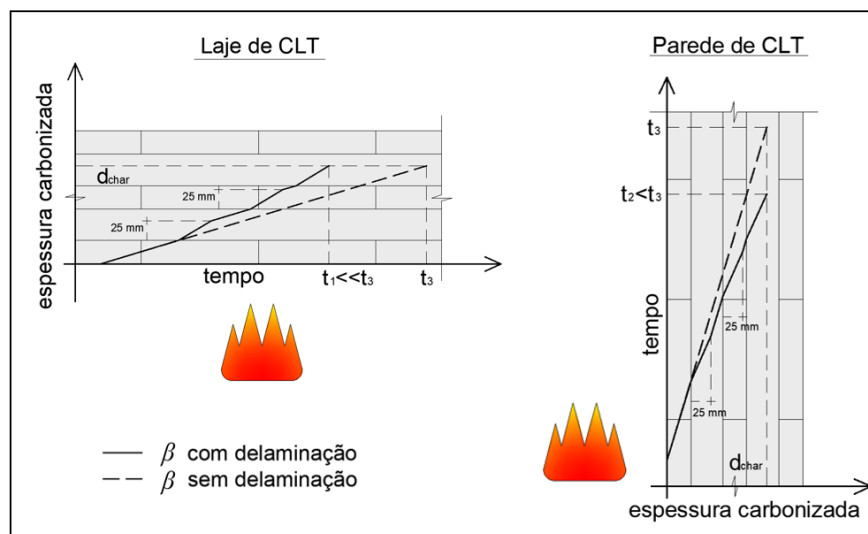
2.4.1 Carbonização do CLT

As placas de CLT apresentam diferenças de comportamento quando comparadas a elementos de madeira serrada em situação de incêndio. Os principais fatores que podem levar à variação do comportamento dos painéis de madeira engenheirada são: a configuração e distribuição das lamelas ao longo da seção transversal, o tipo de adesivo estrutural utilizado na colagem das camadas de madeira bem como as aberturas existentes entre lamelas adjacentes [46].

Frangi, Fontana *et al.* [45] concluíram, a partir de ensaios de elementos de lajes e de paredes de CLT, que existe a possibilidade da camada carbonizada de madeira delaminar antes de ser totalmente consumida, originando um acréscimo da taxa de carbonização da camada seguinte. Observa-se, portanto, o mesmo efeito ocorrido em elementos de madeira revestidos por materiais resistentes ao fogo. Quando o adesivo estrutural atinge uma temperatura elevada, na ordem dos 200 °C [47; 48], a camada de carvão desloca do painel, deixando a lamela adjacente desprotegida.

Ensaio realizados em placas de CLT por Frangi, Fontana *et al.* [49] pontuam que o fenômeno da delaminação ocorre principalmente em painéis produzidos a partir de adesivos a base de poliuretano (PUR). Para placas prensadas com adesivos de Melamina Ureia Formaldeído (MUF), o comportamento apresentado é semelhante ao de elementos de madeira serrada.

Figura 2.26 – Taxa de carbonização das placas de CLT com e sem delaminação.



(Fonte: adaptada de [30]).

Há ainda uma diferença no comportamento de peças de CLT utilizadas como paredes ou como lajes. Os elementos estruturais posicionados na vertical apresentam efeitos de delaminação menos proeminentes, originando pequenas variações das taxas de carbonização [45].

No caso de elementos horizontais, o deslocamento da camada de carvão tende a ser preponderante no dimensionamento do CLT em situação de incêndio. Em ensaios laboratoriais utilizando a curva de incêndio-padrão, Frangi, Fontana *et al.* [49] sugerem considerar em lajes de CLT o dobro do valor da taxa básica de carbonização para os primeiros 25 mm das camadas impactadas pela queda da capa de carvão. As informações estão sumarizadas na Figura 2.26.

Outro aspecto importante observado em ensaios de painéis de CLT é a perda de resistência e de rigidez a longo prazo. Testes de incêndio natural compartimentado [38] apontam que, mesmo após a auto extinção do incêndio, os elementos estruturais de madeira perdem capacidade resistente na fase de resfriamento natural do incêndio.

Apesar de não possuir o ramo descendente da curva de um incêndio natural, os ensaios realizados em fornos utilizando a curva de incêndio-padrão também são adequados para a análise de estruturas em CLT [50], contanto que a concentração de oxigênio seja similar à realidade.

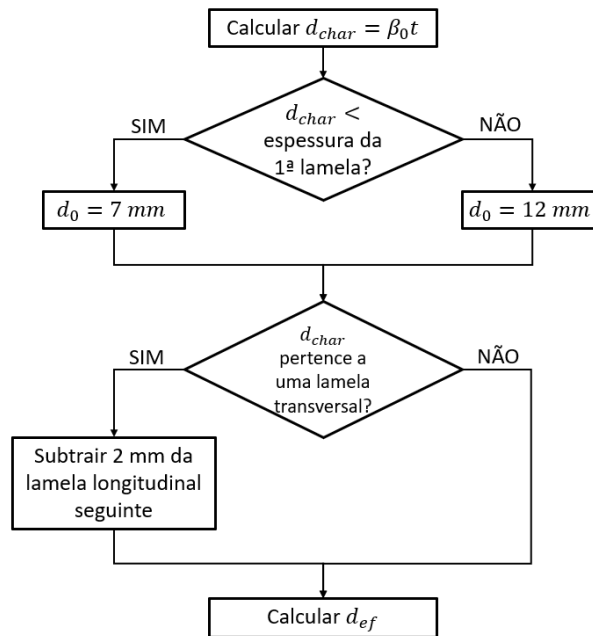
Com relação à camada de resistência nula, observa-se que o valor de d_0 depende da configuração da seção transversal do painel, do uso das placas nas funções de laje ou de parede e da duração do incêndio [51].

O guia elaborado pela *European Cooperation in Science and Technology* (COST) [51] apresenta o método conhecido como “12 e 2” para cálculo de d_0 do lado tracionado de painéis utilizados como lajes, produzidos com adesivos que não delaminam.

Para calcular a espessura de resistência nula, primeiramente é preciso determinar a espessura da camada carbonizada. Caso a capa de carvão não tenha superado a primeira lamela do painel, utiliza-se $d_0 = 7 \text{ mm}$. Caso contrário, utiliza-se $d_0 = 12 \text{ mm}$.

Adicionalmente, caso a espessura da seção residual tenha caído sobre uma lamela transversal, deve-se subtrair da camada longitudinal seguinte um valor de 2 mm. O fluxograma que ilustra o método pode ser visto na Figura 2.27.

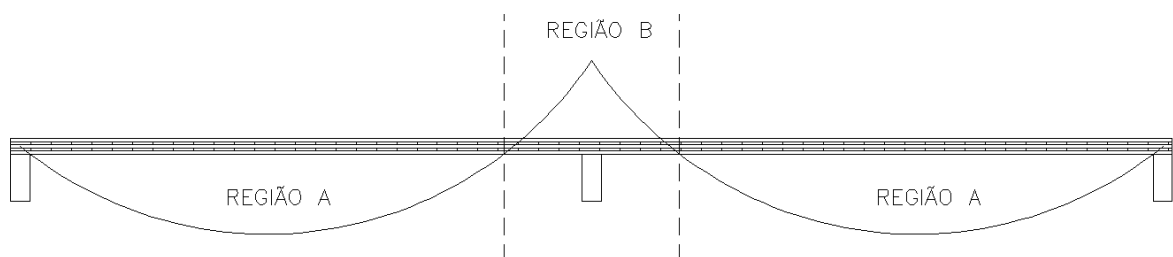
Figura 2.27 – Fluxograma para cálculo de d_0 na superfície tracionada e lajes de CLT.



(Fonte: adaptada de [51]).

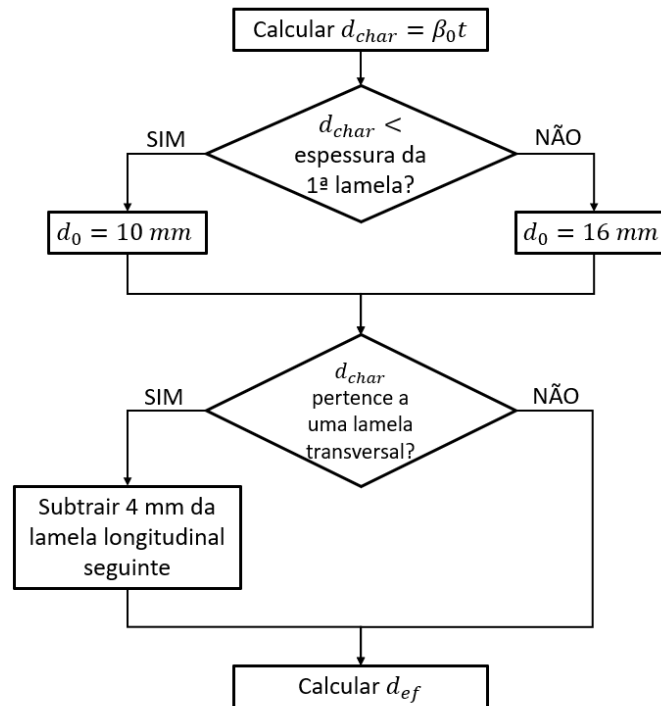
Em casos em que a superfície exposta ao fogo do painel de CLT utilizado na função de laje esteja comprimida, como por exemplo na região próxima ao apoio central de uma laje contínua (ver “Região B” da Figura 2.28), a proposta de revisão do *Eurocode 5* [44] recomenda o fluxograma conforme Figura 2.29. Tal método poderia ser denominado de “16 e 4”.

Figura 2.28 – Momentos fletores nas regiões “A” e “B” de uma laje.



(Fonte: próprio autor).

Figura 2.29 – Fluxograma para cálculo de d_0 na superfície comprimida de lajes de CLT.



(Fonte: adaptada do *Eurocode 5* [44]).

Por fim, alguns fabricantes de CLT [52] recomendam que a espessura residual das lamelas seja de pelo menos 3 mm para que elas façam parte do cálculo dos esforços resistentes da peça em situação de incêndio. Isso ocorre, pois, a queima da madeira ao longo de um plano pode apresentar um comportamento não linear, afetando em alguns pontos a espessura residual da lamela.

2.4.2 Ações e segurança das estruturas em CLT em situação de incêndio

De acordo com Silva [53], na temperatura ambiente, a segurança estrutural é considerada verificada quando os esforços atuantes forem menores ou iguais aos esforços resistentes, de tal modo que seja respeitada a Equação 6.

$$S_d \leq R_d \quad (6)$$

Sendo S_d o valor de cálculo dos esforços atuantes e R_d o valor de cálculo dos esforços resistentes. Em situação de incêndio, garante-se a segurança da estrutura caso a Equação 7 seja verdadeira.

$$S_{d,fi} \leq R_{d,si} \quad (7)$$

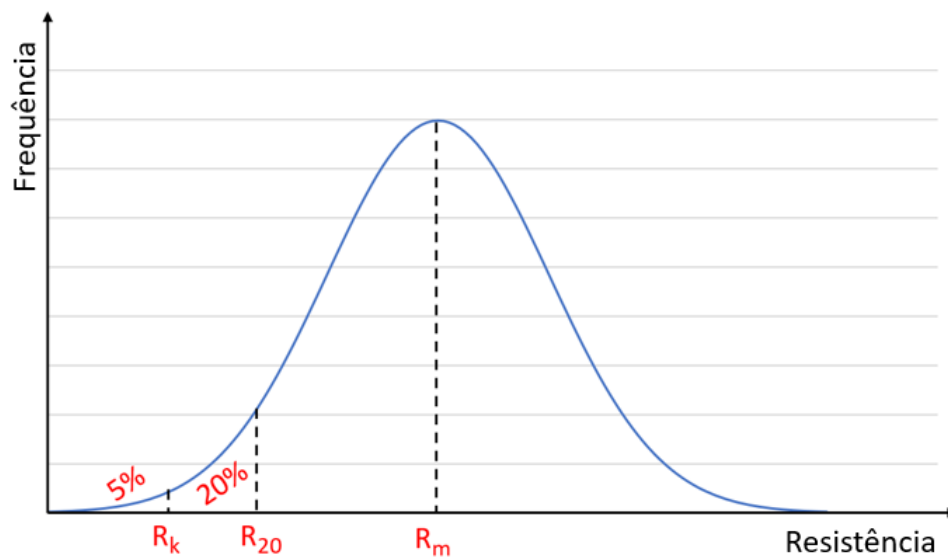
Sendo $S_{d,fi}$ o valor de cálculo dos esforços atuantes determinados a partir da combinação última excepcional e $R_{d,fi}$ o valor de cálculo dos esforços resistentes, alterados em função da degradação térmica causada pelo incêndio.

Considerando os coeficientes ponderados e os fatores de combinação das edificações correntes submetidas a um carregamento excepcional, o *Eurocode 5* [36], de maneira simplificada, sugere multiplicar S_d por um fator η igual a 0,6 para calcular $S_{d,fi}$. Ou seja, $S_{d,fi} = 0,6 \times S_d$. Com relação à determinação dos esforços resistentes, o *Eurocode 5* [36] indica a Equação 8.

$$R_{d,si} = k_{mod,fi} \times \frac{R_{20}}{\gamma_{m,fi}} \quad (8)$$

Sendo o coeficiente de modificação em incêndio $k_{mod,fi} = 1$, o valor do ponderador de segurança em situação de incêndio $\gamma_{m,fi} = 1$, e R_{20} a resistência referente ao vigésimo percentil da curva normal representada pela Figura 2.30.

Figura 2.30 - Curva normal para determinação da resistência da madeira.



(Fonte: próprio autor).

O valor de R_{20} é determinado por meio da Equação 9, considerando $k_{fi} = 1,15$ para o CLT [44].

$$R_{20} = k_{fi} \times R_k \quad (9)$$

2.4.3 Curvas paramétricas em estruturas de CLT

As normas de projeto de estruturas usualmente adotam o modelo de incêndio-padrão descrito pela norma ISO 834 [37] para determinar a redução da capacidade resistente e da rigidez dos elementos estruturais em decorrência da ação térmica de um incêndio.

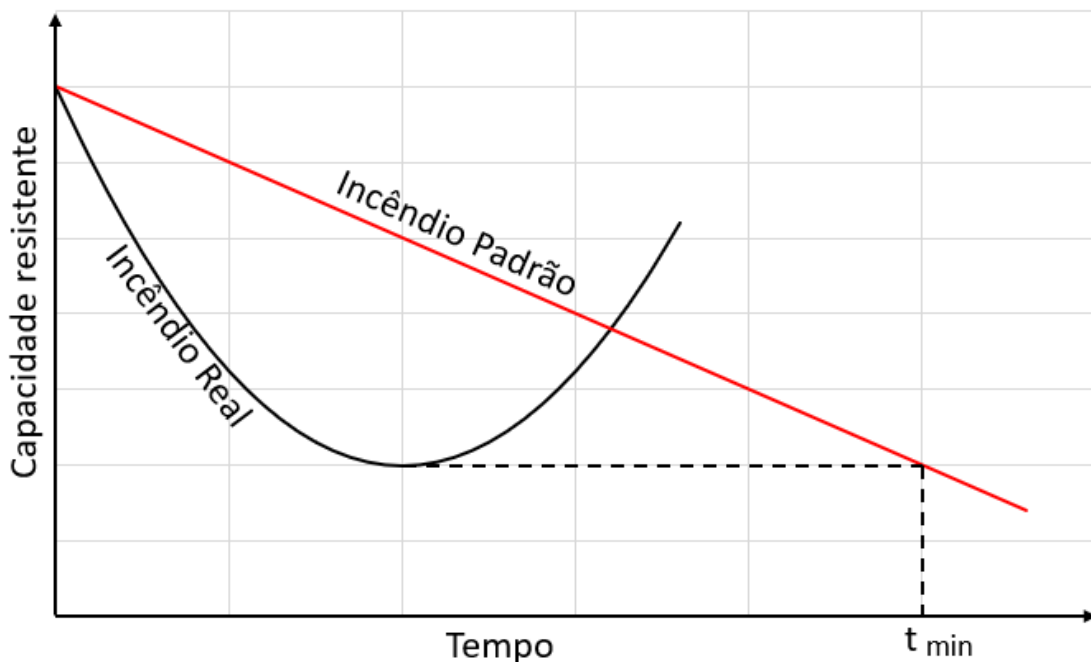
Conforme apresentado no item 2.3.1, o método da seção reduzida se baseia na curva padrão para determinar a taxa de carbonização e a espessura da camada de resistência nula.

De acordo com Silva [53], a curva padrão não representa o comportamento de um incêndio real. Entretanto, o meio técnico admite a adoção do modelo de elevação de temperatura padronizado associado a um tempo mínimo de resistência ao fogo, denominado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), para determinação dos parâmetros de projeto.

Portanto, espera-se que a ação térmica fornecida pelo TRRF associado a curva-padrão gere um dano à estrutura no mínimo igual ou superior ao dano gerado pela variação de temperatura de um incêndio real.

Thomas, Buchanan *et al.* [54] sugerem calcular o tempo mínimo de exposição de um elemento estrutural ao fogo-padrão a partir da equivalência entre as perdas de capacidade resistente do elemento submetido à curva-padrão e à curva real, conforme ilustrado pela Figura 2.31.

Figura 2.31 - Perda de capacidade resistente incêndio padrão x incêndio real.



(Fonte: adaptada de [54]).

O Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo [31] admite que as estruturas estarão seguras caso sejam dimensionadas para resistir à curva de incêndio-padrão associada aos Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo indicados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) em minutos.

Classe de Ocupação	Altura da edificação h [m]							
	$h \leq 6$	$6 < h \leq 12$	$12 < h \leq 23$	$23 < h \leq 30$	$30 < h \leq 80$	$80 < h \leq 120$	$120 < h \leq 150$	$150 < h \leq 250$
Residencial	30	30	60	90	120	120	150	180
Hóteis	30	60	60	90	120	150	180	180
Escritórios	60	60	60	90	120	150	150	180
Escolas	30	30	60	90	120	120	150	180
Hospitais	30	60	60	90	120	150	180	180

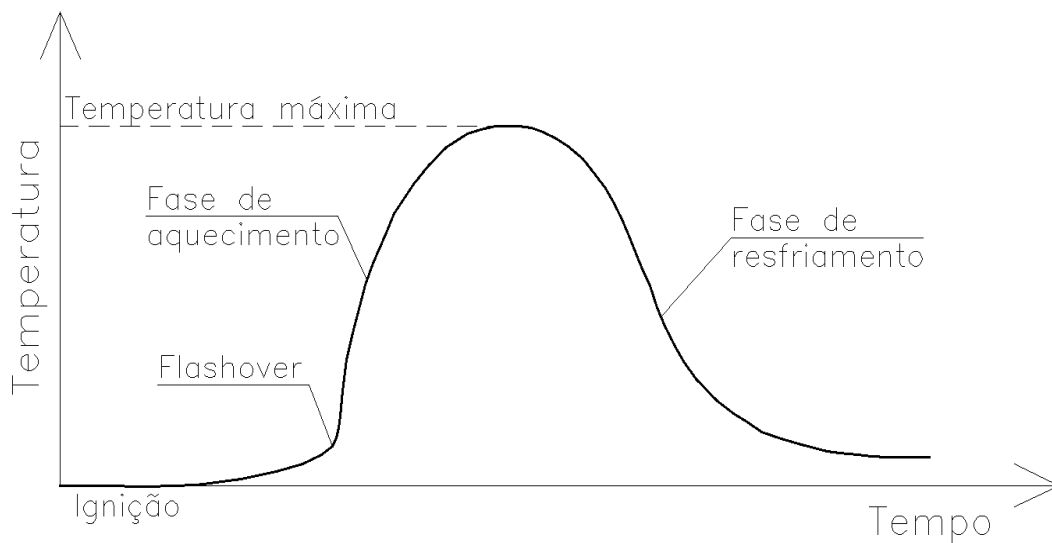
(Fonte: adaptada de [31]).

A curva de incêndio-padrão tem como característica principal possuir apenas o ramo ascendente de variação da temperatura além de ser independente da carga térmica disponível no ambiente e das características do compartimento, tais como a presença de portas e janelas. Portanto, a curva padrão não varia em função do material estrutural que está sendo analisado.

A curva de incêndio real, por sua vez, possui três fases distintas. Na primeira fase, conhecida como fase de ignição ou *pré-flashover*, observa-se um aumento gradual e lento das temperaturas no interior do ambiente. Na sequência, observa-se a fase de aquecimento descontrolado que é iniciada após um instante específico denominado de *flashover* ou instante de inflamação generalizada.

A partir desse momento, todos os produtos fabricados a partir de materiais combustíveis, tais como os móveis, tapetes e cortinas, são consumidos pelo fogo. Na terceira e última fase, ocorre a queda gradativa da temperatura no interior do ambiente a partir da extinção dos materiais combustíveis. A curva de um incêndio real pode ser observada na Figura 2.32.

Figura 2.32 - Curva de um incêndio real.



(Fonte: adaptada de [53]).

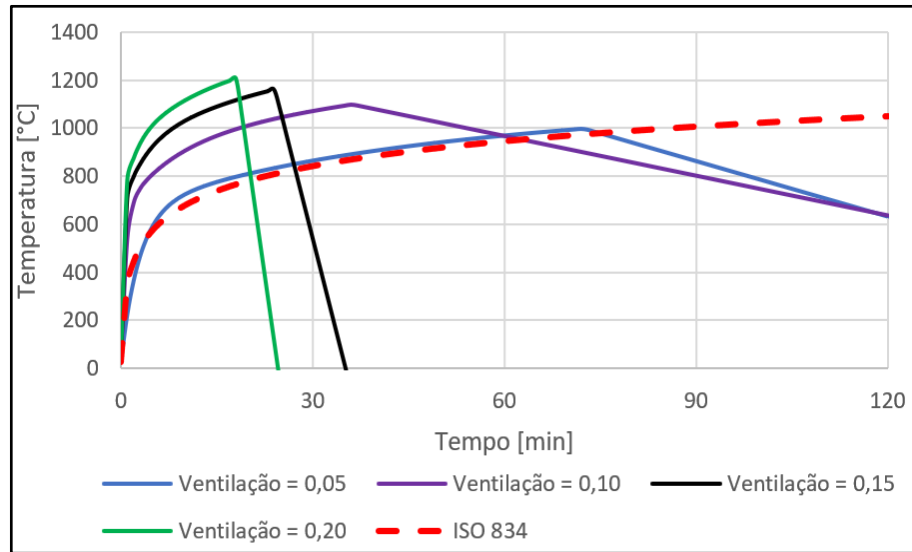
As curvas de incêndio real podem ser determinadas experimentalmente a partir da realização de ensaios de incêndio natural compartimentado. Para que seja possível realizar a investigação experimental, é necessário que sejam conhecidos alguns parâmetros como por exemplo a carga de incêndio, o grau de ventilação relacionado às aberturas e as características dos materiais de vedação.

Portanto, caso a segurança da estrutura seja verificada a partir de curvas de incêndio natural, a quantidade de madeira exposta ao fogo utilizada com função estrutural influencia diretamente na análise. Quanto maior for área de madeira exposta ao fogo, maior será a temperatura e a duração do incêndio.

Adicionalmente, observa-se que as curvas de incêndio natural desprezam a primeira fase dos incêndios reais, uma vez que as baixas temperaturas observadas nessa etapa não influenciam na perda de capacidade resistente das estruturas.

Um comparativo entre a curva de incêndio-padrão e as curvas paramétricas de incêndio natural compartimentado variando a quantidade de janelas do ambiente pode ser observado na Figura 2.33.

Figura 2.33 - Comparativo entre curvas de incêndios naturais e a curva ISO 834.



(Fonte: próprio autor).

Nos últimos anos, a *National Fire Protection Association* (NFPA) [55] realizou uma série de ensaios de incêndios naturais compartimentados para determinar a influência da quantidade de CLT exposto ao fogo nas curvas de incêndio paramétrico.

A espessura de madeira carbonizada é calculada de maneira iterativa, uma vez que depende da temperatura do ambiente, que por sua vez é função da quantidade de madeira queimada e da velocidade de carbonização das peças. As Equações 10 a 24, extraídas dos estudos da NFPA [55], descrevem as curvas paramétricas. O ramo ascendente é dado por:

$$\theta_g = 1325(1 - 0,324e^{-0,2t\Gamma} - 0,204e^{-1,7t\Gamma} - 0,472e^{-19t\Gamma}) + \theta_0 \quad (10)$$

Sendo θ_g a temperatura dos gases em °C, θ_0 a temperatura ambiente em °C, t o tempo em horas e Γ dado por:

$$\Gamma = \frac{(\vartheta/0,04)^2}{(b/1160)^2} \quad (11)$$

Onde ϑ é o grau de ventilação que não deve ser menor do que 0,02 e nem maior do que 0,2. Calcula-se ϑ conforme a Equação 12:

$$\vartheta = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (12)$$

Considerando A_v a área total de aberturas para o ambiente externo em m^2 , A_t a soma das áreas do piso, teto, paredes e aberturas em m^2 e h_{eq} a altura média das aberturas, em metros.

O parâmetro b leva em consideração as características físico-térmicas dos materiais do compartimento e é calculado por meio da Equação 13.

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (13)$$

A densidade ρ é medida em kg/m^3 , o calor específico c em $J/kg \text{ } ^\circ C$ e a condutividade térmica λ em $W/m \text{ } ^\circ C$. A duração máxima do ramo ascendente da curva paramétrica segue a Equação 14.

$$t_{max} = \max [0,2 \times 10^{-3} q_{t,d}/\vartheta; t_{lim}] \quad (14)$$

Sendo $q_{t,d}$ a carga de incêndio de cálculo total relacionada à área total do compartimento, medida em MJ/m^2 e calculada de acordo com a Equação 15.

$$q_{t,d} = q_{fi,d} \times \frac{A_f}{A_t} \quad (15)$$

Sendo A_f a área do piso em m^2 e $q_{fi,d}$ a carga de incêndio de cálculo total relacionada à área do piso, medida em MJ/m^2 e calculada de acordo com as cargas de incêndio características apresentadas nas instruções técnicas do Corpo de Bombeiros.

O valor de t_{lim} é determinado em função da velocidade de desenvolvimento do incêndio [53], sendo 0,15 h para incêndios de desenvolvimento rápido típicos de bibliotecas e teatros, 0,20 h para incêndios de desenvolvimento médio observados em escritórios, residências e hotéis e 0,25 h para desenvolvimentos lentos típicos de áreas de transbordo de passageiros. O ramo descendente da curva paramétrica segue as Equações 16, 17 e 18.

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 625(t\Gamma - t_{max}\Gamma\chi), \text{ para } t_{max}\Gamma \leq 0,5 \text{ h} \quad (16)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250(3 - t_{max}\Gamma)(t\Gamma - t_{max}\Gamma\chi), \text{ para } 0,5 < t_{max}\Gamma \leq 2 \text{ h} \quad (17)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250(t\Gamma - t_{max}\Gamma\chi), \text{ para } t_{max}\Gamma > 2 \text{ h} \quad (18)$$

Sendo $\chi = 1$ caso o incêndio seja controlado pela ventilação, ou seja, quando $t_{max} > t_{lim}$. Caso o incêndio seja controlado pelo combustível ($t_{max} = t_{lim}$), $\chi = t_{lim}\Gamma/t_{max}\Gamma$. A taxa de carbonização β_{par} é calculada a partir da taxa de carbonização padrão β_0 e do parâmetro Γ . O cálculo é dado pela Equação 19.

$$\beta_{par} = 1,5\beta_0 \frac{(0,2\sqrt{\Gamma}-0,04)}{(0,16\sqrt{\Gamma}+0,08)} \quad (19)$$

A espessura de madeira carbonizada é calculada iterativamente conforme as Equações 20, 21 e 22.

$$d_{char} = \beta_{par} t, \text{ para } t < t_0 \quad (20)$$

$$d_{char} = \beta_{par} \left(1,5t - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right), \text{ para } t_0 \leq t \leq 3t_0 \quad (21)$$

$$d_{char} = 2\beta_{par} t, \text{ para } t > 3t_0 \quad (22)$$

Com t_0 calculado conforme Equação 23.

$$t_0 = 0,009 \frac{q_{t,d}}{\vartheta} \quad (23)$$

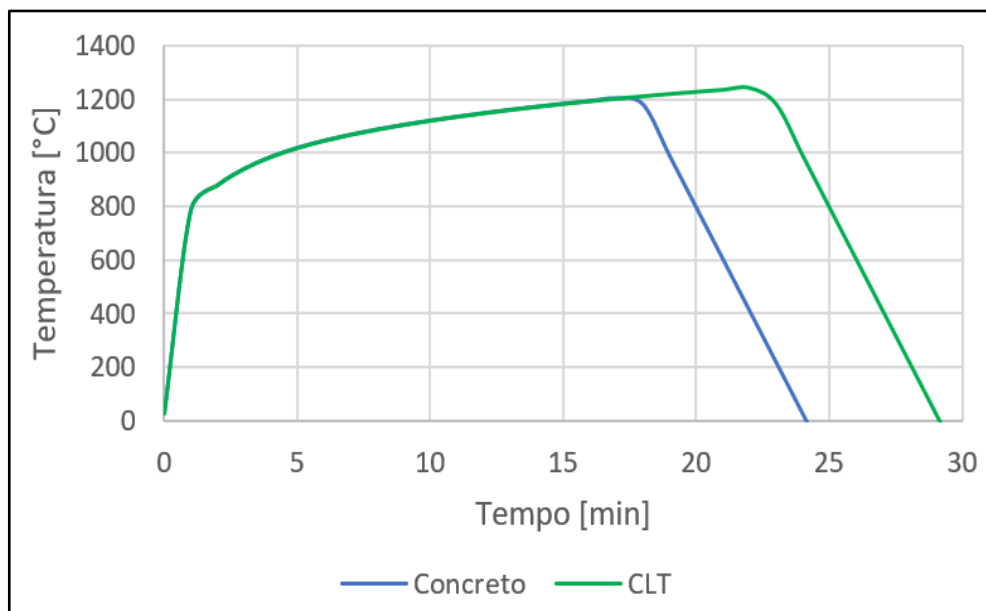
A carga térmica total, incluindo a contribuição dos painéis de CLT expostos ao fogo, é calculada iterativamente conforme a Equação 24.

$$q_{t,d}^{i+1} = q_{t,d}^1 + \frac{A_{CLT} \alpha_1 (d_{char}^i - 0,7 \beta_{par} t_{max}^i)}{A_t} \quad (24)$$

Sendo A_{CLT} a área de CLT exposta ao fogo e $\alpha_1 = 5,39 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{mm}$ a relação entre a quantidade de calor emitida e a camada de carvão. Observa-se que apenas os itens com índice i são calculados iterativamente.

As equações são válidas apenas para painéis de CLT produzidos com adesivos resistentes ao fogo. O modelo não prevê a ocorrência de delaminações das placas de madeira engenheirada ou o desprendimento dos materiais de revestimento resistentes ao fogo. A diferença entre as curvas paramétricas para uma estrutura convencional e para uma estrutura de CLT com os painéis expostos ao fogo pode ser observada na Figura 2.34.

Figura 2.34 - Comparativo entre curvas de incêndios naturais em estruturas de concreto e de CLT.



(Fonte: próprio autor).

A partir da Figura 2.34, observa-se que o incêndio em estruturas de CLT com os painéis expostos ao fogo é mais severo do que o incêndio em estruturas não combustíveis, conforme esperado.

2.4.4 Auto extinção de um incêndio

O fenômeno da auto extinção ocorre quando o incêndio em uma edificação de madeira cessa após a queima completa dos demais materiais combustíveis presentes no interior do compartimento, tais como móveis e revestimentos, sem a necessidade de intervenções externas.

Durante o processo, a madeira passa da fase de combustão flamejante para a fase de pirólise lenta sem chamas. Com o decaimento da temperatura, a camada carbonizada resfria naturalmente, resultando na auto extinção do fogo.

As principais variáveis que interferem no controle natural do incêndio são: o fluxo de calor ao qual a madeira é submetida, a velocidade do ar e a quantidade de oxigênio na superfície das peças.

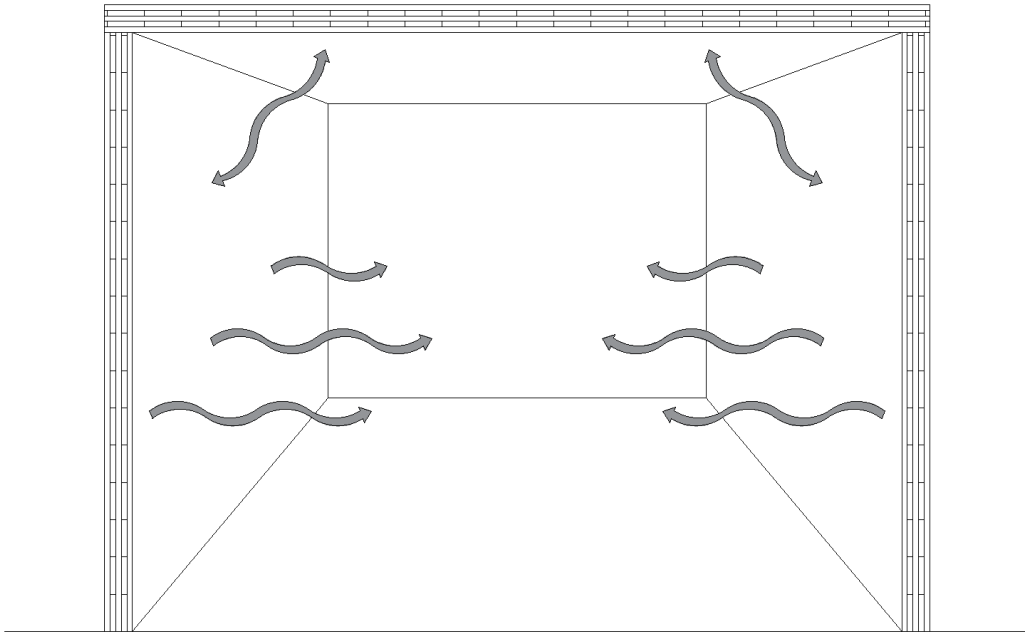
Crielaard, Kuilen *et al.* [56] relatam que, para a madeira continuar queimando, é necessário que exista uma fonte externa de calor. Ou seja, o calor gerado pela queima da madeira não é suficiente para sustentar sua própria combustão.

Drysdale [35] observa que peças de madeira de grandes dimensões tendem a se auto extinguir após a retirada da fonte externa de calor. Em contrapartida, peças de madeira de pequenas dimensões tendem a ser totalmente consumidas, mesmo quando não estiverem submetidas a um fluxo de calor externo.

Emberley [57] conclui que a auto extinção de painéis de madeira massiva ocorre independentemente da duração do incêndio, contanto que o fluxo de calor aplicado seja interrompido. Em contrapartida, Wiesner, Bisby *et al.* [38] argumentam que a auto extinção pode nunca ocorrer em edifícios que possuam uma quantidade elevada de madeira exposta ao fogo, uma vez que o fluxo de calor cruzado entre elementos (Figura 2.35) inviabiliza o resfriamento natural da madeira [56].

Portanto, a geometria e as distâncias entre elementos estruturais de madeira expostos ao fogo influenciam diretamente na auto extinção do fogo.

Figura 2.35 – Fluxo de calor radiante cruzado.

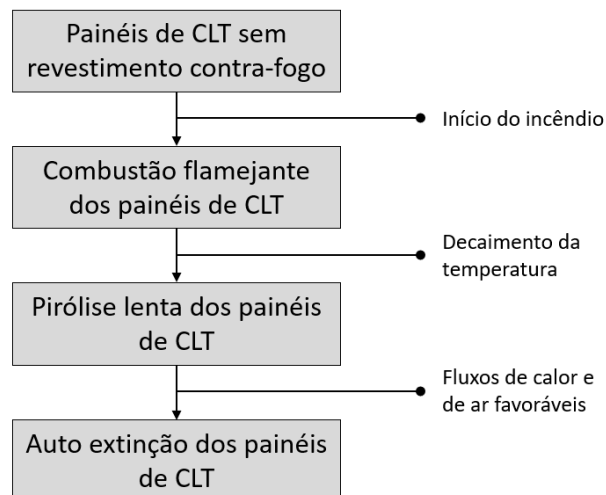


(Fonte: próprio autor).

Crielaard, Kuilen *et al.* [56] afirmam que a madeira continuará se degradando por pirólise caso esteja submetida a um fluxo de ar. Apesar da quantidade do oxigênio interferir na queima da madeira [58], a velocidade do ar tende a ser a variável mais crítica.

O fluxograma apresentado pela Figura 2.36 ilustra o caminho para a auto extinção de edifícios de CLT.

Figura 2.36 – Fluxograma para auto extinção do CLT.



(Fonte: adaptada de [56]).

Os testes de Crielaard, Kuilen *et al.* [56] indicaram que existe a possibilidade de ocorrer a auto extinção dos painéis de CLT para fluxos de calor entre 5 e 6 kW/m², contanto que a velocidade do ar seja inferior à 0,5 m/s.

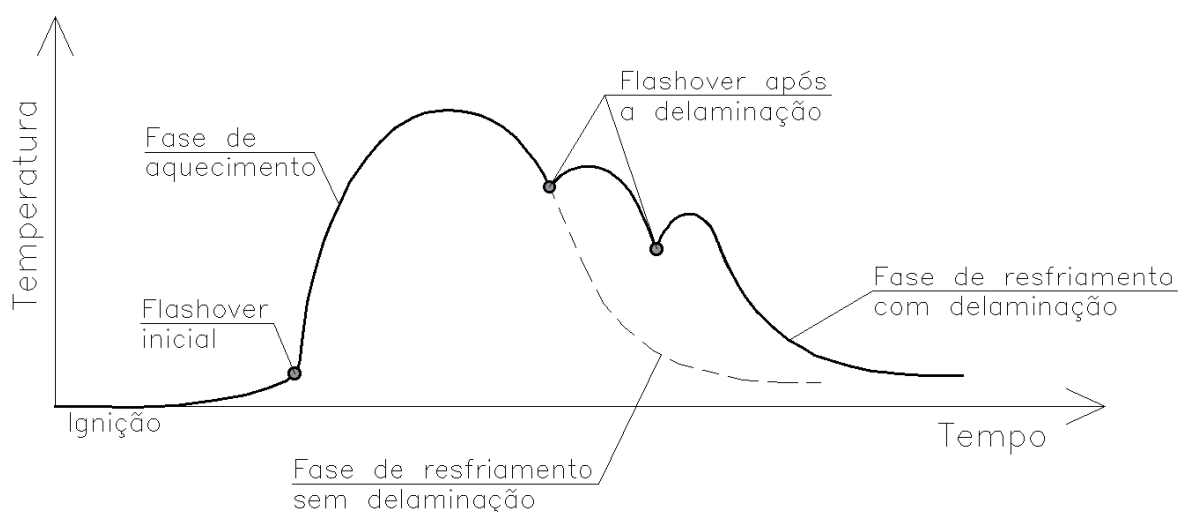
Ensaio de painéis de CLT executados por Emberley [57] relataram que a auto extinção ocorre para o valor de taxa de queima inferior à 4,0 g/m²s. O mesmo autor destacou que a combustão flamejante dos painéis de CLT é contida para um fluxo de calor menor do que 44 kW/m².

Crielaard, Kuilen *et al.* [56] alertam para o fato da delaminação dos painéis de CLT poder inviabilizar a auto extinção da estrutura de madeira. Uma vez que a camada carbonização se desprende, o CLT retorna à fase de combustão flamejante, interrompendo o decaimento da temperatura do compartimento. Caso ocorram sucessivos deslocamentos, o painel tende a ser completamente consumido pelo fogo.

Adicionalmente, Emberley [57] pontua que quando ocorre a re-ignição do CLT, a taxa de queima apresenta valores acima do ponto crítico, impossibilitando a auto extinção.

Ensaio de incêndios naturais compartimentados, realizados pela NFPA [55], relataram um aumento expressivo da temperatura na fase de resfriamento dos testes causado pela delaminação das placas, conforme ilustrado pela Figura 2.37. Como consequência disso, o estudo concluiu que, caso o incêndio não seja combatido, a estrutura de madeira pode ser totalmente consumida pelo fogo.

Figura 2.37 – Incêndio natural com e sem delaminação.



(Fonte: próprio autor).

As mesmas conclusões foram obtidas a partir dos ensaios compartimentados realizados por Mcgregor [59].

Em ensaios de incêndio-padrão, o efeito da delaminação também é observado [60]. Nessas situações, o deslocamento das lamelas de CLT contribuiu para o aumento da taxa de carbonização medida após a finalização dos testes.

Frangi, Fontana *et al.* [49] pontuam que os painéis de CLT compostos por lamelas mais espessas possuem um desempenho superior quando comparados aos painéis produzidos com lamelas mais finas. Isso também é função da delaminação das placas. Quanto mais espessa for a lamela, menor o número de delaminações ao longo do teste.

2.4.5 *Compartimentação em estruturas de CLT*

A compartimentação é uma das principais medidas de proteção passiva de edificações em situação de incêndio. A compartimentação se divide em dois grupos: a vertical, que impede a propagação do incêndio entre pavimentos de uma edificação e a horizontal, que não permite a passagem de gases quentes e calor entre compartimentos do mesmo piso.

Os elementos construtivos que possuem a função de compartimentação devem ser capazes de isolar termicamente e de manter a estanqueidade do compartimento durante o incêndio. Alguns exemplos desse tipo de elemento são as portas-corta fogo e as paredes de compartimentação.

Caso o elemento construtivo também tenha função estrutural, é necessário que este não colapse durante um incêndio. Os principais elementos estruturais de compartimentação são as lajes e as paredes estruturais.

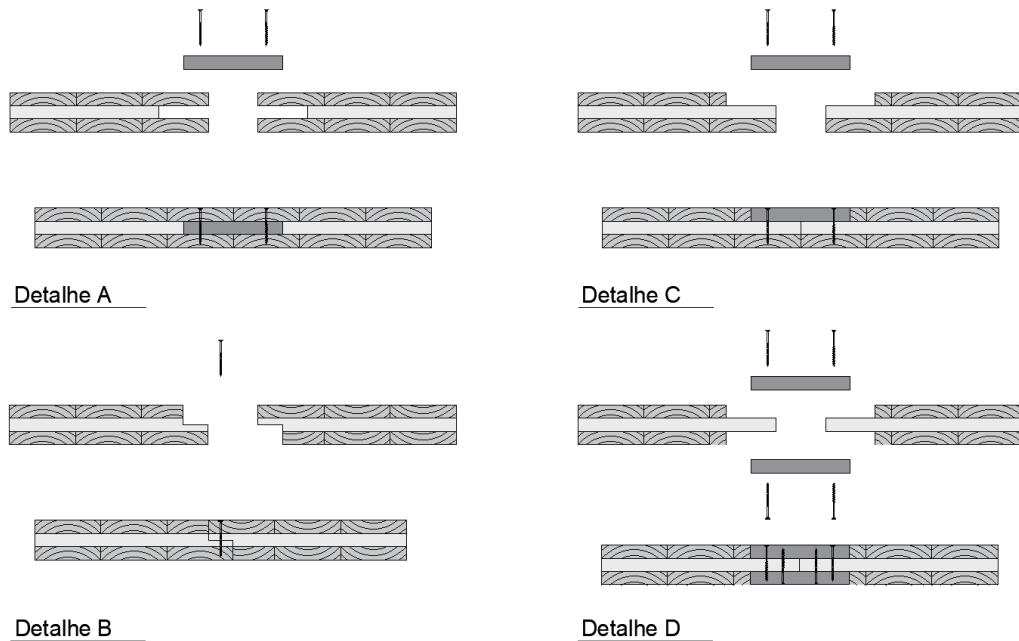
De acordo com Silva [53], o isolamento térmico é garantido caso a temperatura na face não exposta ao fogo do elemento construtivo permaneça abaixo dos 140 °C na média e dos 180 °C no pico. Dessa maneira, evita-se a ignição por elevação de temperatura do compartimento vizinho.

A estanqueidade ocorre quando um elemento construtivo se mantém íntegro durante um incêndio, ou seja, quando não surgem fissuras e aberturas pelas quais seria possível ocorrer a passagem de chamas e gases quentes entre compartimentos.

O capítulo referente à segurança das estruturas em situação de incêndio do *Canadian CLT Handbook* [34] relata que a perda da estanqueidade em edifícios de CLT usualmente ocorre nas junções entre painéis.

As principais uniões entre placas de CLT utilizadas na função de lajes estão ilustradas pela Figura 2.38.

Figura 2.38 – Detalhes de junções entre painéis de CLT.



(Fonte: adaptada de [34]).

O documento canadense apresenta uma metodologia para o dimensionamento das espessuras dos painéis de CLT visando a manutenção da estanqueidade do elemento estrutural para todos os detalhes apresentados na Figura 2.38.

O cálculo segue a Equação 25:

$$H = \frac{\beta_0 t}{k_j} \quad (25)$$

O coeficiente de junção entre painéis k_j é igual a 0,3 para o Detalhe A, 0,35 para o Detalhe B e 0,6 para os Detalhes C e D. Observa-se que os últimos dois detalhes são mais eficientes, uma vez que resultam espessuras de painéis de CLT menores do que os Detalhes A e B.

O *Canadian CLT Handbook* [34] destaca que é possível acrescentar outros materiais ou produtos sobre os painéis de CLT, como por exemplo um contrapiso de concreto ou placas de gesso acartonado, para complementar a espessura do painel e viabilizar a manutenção da estanqueidade do sistema construtivo.

É importante destacar que a metodologia apresentada possui validade apenas para junções vedadas com selantes resistentes ao fogo. Usualmente, os materiais de vedação são aplicados tanto nas juntas da face exposta ao fogo quanto nas aberturas da face não exposta, uma vez que a madeira carbonizada reduz a espessura do painel íntegro, formando aberturas pelas quais a fumaça pode passar.

Sobre o isolamento térmico, observa-se que, em função da baixa condutividade térmica da madeira (aproximadamente 15% do valor do concreto), a transferência de calor por condução através dos painéis de CLT ocorre de maneira lenta.

Apesar de possuir um comportamento complexo em virtude do surgimento do carvão, é possível simular a transferência de calor em placas de madeira utilizando softwares de elementos finitos que, em geral, solucionam a equação diferencial de elementos 3D, conforme Equação 26.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_x \partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k_y \partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_z \partial T}{\partial z} \right] + Q' = \frac{\rho c \partial T}{\partial t} \quad (26)$$

Sendo: k_x , k_y e k_z a condutividade térmica nas três direções, T a temperatura, Q' o calor gerado pela madeira, ρ a densidade da madeira, c o calor específico e t o tempo.

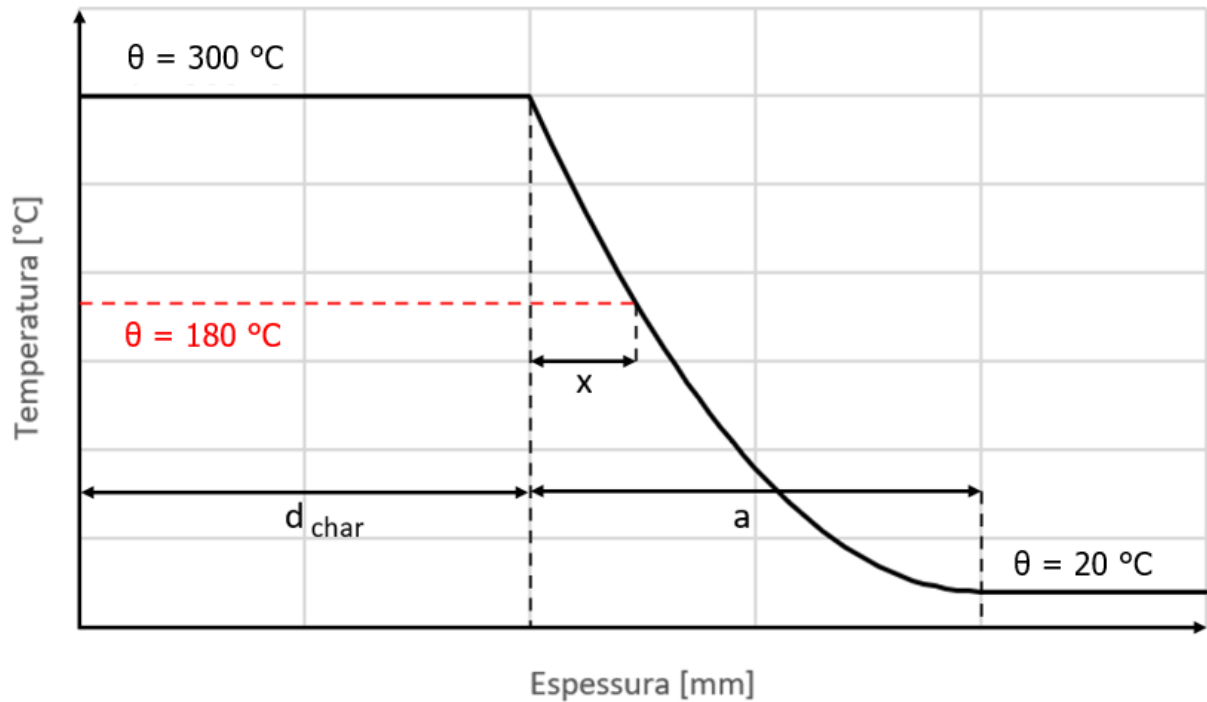
Para simplificar os cálculos, o *Canadian CLT Handbook* [34] apresenta um método para determinação da temperatura em qualquer ponto da seção transversal a partir da camada de carvão, conforme Equação 27.

$$\theta = \theta_0 + (\theta_p - \theta_0) \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2 \quad (27)$$

Sendo: θ a temperatura no ponto, θ_0 a temperatura ambiente, θ_p a temperatura da capa de carvão (300 °C), a a distância em que a madeira é afetada pela temperatura e x a distância até o ponto. Conforme apontado por Schaffer [43] em seus ensaios, é possível considerar $a = 40 \text{ mm}$.

A partir da Equação 27, estima-se que sejam necessários apenas 10 mm após a camada de carvão para que a temperatura atinja 180 °C. Portanto, conclui-se que o isolamento térmico não representa o caminho crítico para a compartimentação de uma estrutura de CLT. A evolução da temperatura através da seção transversal de um painel de CLT pode ser observada na Figura 2.39.

Figura 2.39 – Fluxo de temperatura através do CLT.



(Fonte: próprio autor).

Os produtores de CLT, a partir da publicação de suas *ETAs*, trazem informações adicionais relacionadas à capacidade de compartimentação de seus produtos. O documento técnico publicado pela KLH [3] indica que os painéis fabricados pela empresa austríaca isolam termicamente e são estanques se:

- Mantiverem ao menos duas camadas de lamelas após o incêndio;
- A linha de cola estiver a pelo menos 15 mm de distância da camada carbonizada.

Adicionalmente, o produtor informa que não haverá a necessidade de aplicação de selantes resistentes ao fogo nas juntas caso:

- A temperatura da face não exposta ao fogo seja inferior a 120 °C ;
- O espaçamento entre os parafusos que conectam os dois painéis seja de no máximo 250 mm;
- A temperatura do plano horizontal central das conexões do tipo “meia madeira”, representadas pelo Detalhe B da Figura 2.38, não supere 150 °C .

O documento elaborado pela COST [51] informa que, caso a distância da capa de carvão ao plano horizontal intermediário/central das conexões do tipo A, B e C seja superior a 20 mm, a compartimentação está garantida.

2.4.6 Ligações das estruturas de madeira

As ligações entre elementos de madeira são essenciais para a determinação da resistência, da rigidez, da estabilidade, da ductilidade e da segurança das estruturas em situação de incêndio.

Entende-se como ligações, todos os dispositivos necessários para a união entre dois ou mais elementos estruturais. Os principais tipos de ligações são compostos por: parafusos passantes com porcas e arruelas, parafusos de rosca soberba, pregos, pinos, cavilhas, anéis metálicos, chapas metálicas, entre outros.

O projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190 [13], baseando-se no *Eurocode 5*, apresenta os critérios de dimensionamento dos principais tipos de ligação. Em geral, a capacidade resistente das conexões em temperatura ambiente depende da resistência ao embutimento da madeira e do momento resistente do conector.

Em situação de incêndio, as ligações das estruturas de madeira tendem a ser o ponto crítico. O *Canadian CLT Handbook* [34] observa que, devido à alta condutividade térmica dos metais utilizados nas conexões, em especial o aço e o alumínio, quando a ligação é exposta diretamente ao fogo, as peças metálicas conduzem calor para o interior da madeira.

Como consequência disso, ocorre a carbonização da madeira no entorno do conector, resultando na diminuição ou perda da capacidade resistente e da rigidez da ligação. O fenômeno pode ser observado na Figura 2.40.

Figura 2.40 – Ligações de peças de madeira expostas diretamente ao fogo.



(Fonte: Palma [61]).

Portanto, é necessário que seja realizada uma análise criteriosa com relação ao detalhamento e execução das conexões das estruturas de madeira.

As ligações entre elementos estruturais, no que diz respeito à capacidade resistente ao fogo, podem ser classificadas em dois grupos:

- Ligações expostas diretamente ao fogo, sem revestimentos contra fogo.
- Ligações com materiais de revestimento contra fogo.

Em linhas gerais, o grupo de ligações expostas diretamente ao fogo possui capacidade de resistir a no máximo 30 minutos de um incêndio-padrão [61].

O *Eurocode 5* apresenta uma metodologia para o dimensionamento das conexões desse tipo. Para a realização dos cálculos de acordo com a norma europeia, é necessário que sejam respeitadas uma série de regras, tais como espessuras mínimas das ligações e das peças de madeira, espaçamentos mínimos, quantidade e dimensões mínimas dos conectores, entre outros. A velocidade com que o calor é transferido pelo conector metálico também é levada em consideração para a análise.

O *International Building Code*, por sua vez, indica que todas as conexões devem ser revestidas com materiais resistentes ao fogo por meio do uso de placas de gesso acartonado ou por peças de madeira. Nesse caso, o código de obras norte americano informa que a temperatura das conexões não deve superar 139 °C na média e 181 °C no pico. As proteções dos conectores metálicos com o uso de cavilhas e peças de madeira podem ser observadas na Figura 2.41.

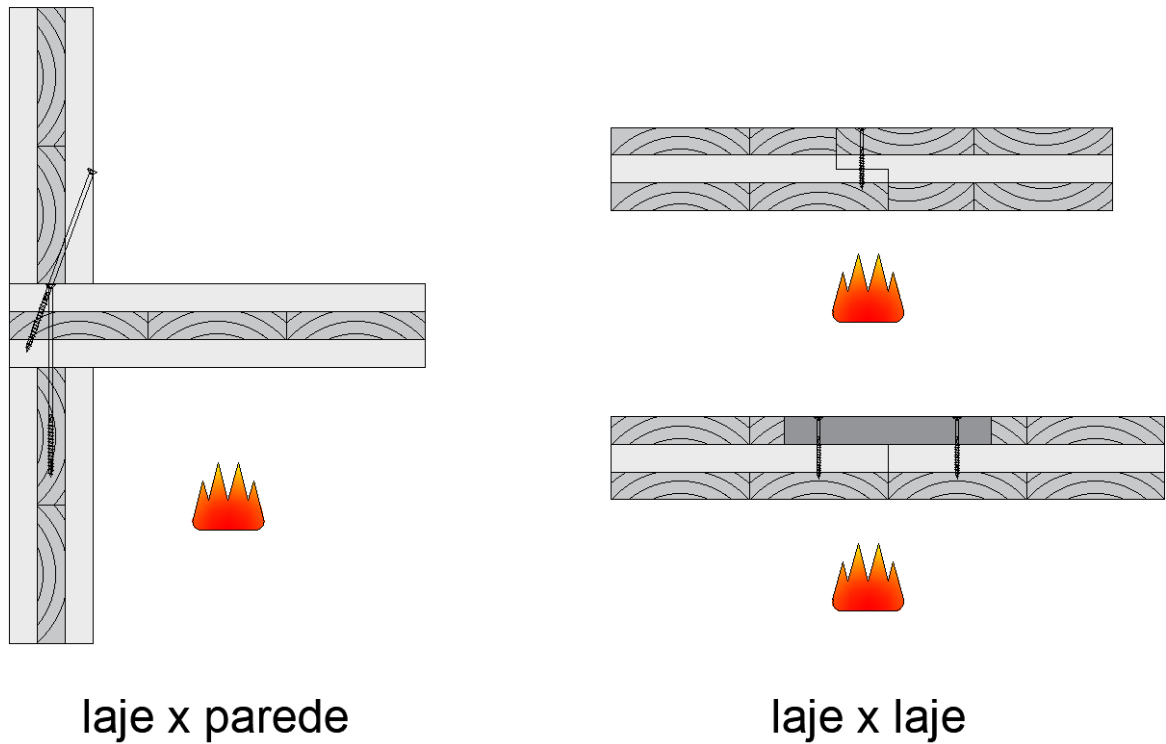
Figura 2.41 – Conexões protegidas com elementos de madeira.



(Fonte: adaptada do IBC 2021 [17]).

Em estruturas de CLT, existem diversos detalhes de ligações que mantêm os conectores embutidos dentro dos painéis, conforme exemplificado pela Figura 2.42.

Figura 2.42 – Detalhe de parafusos embutidos no CLT.

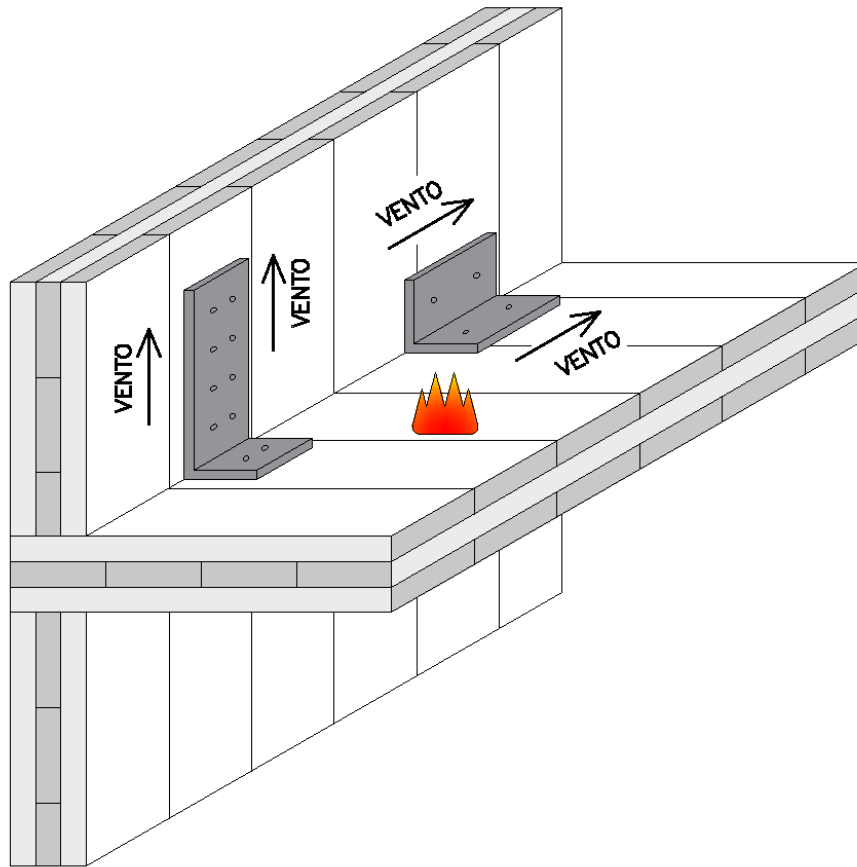


(Fonte: próprio autor).

A ETA da KLH [3], corroborando as informações apresentadas no IBC 2021, observa que caso a temperatura dos conectores embutidos no CLT não supere 200 °C, as propriedades mecânicas da ligação permanecem inalteradas.

O *Canadian CLT Handbook* [34] adiciona que não há problemas em deixar alguns tipos de conexões que ligam os painéis de CLT expostos ao fogo, tais como as cantoneiras e chapas metálicas utilizadas para combater esforços de vento (Figura 2.43), uma vez que essas ações são menos relevantes para a verificação da segurança das estruturas em situação de incêndio.

Figura 2.43 – Cantoneiras metálicas expostas ao fogo.



(Fonte: próprio autor).

2.4.7 Reação ao fogo

O controle dos materiais utilizados como revestimento é um dos principais itens relacionados à segurança das edificações em situação de incêndio. Como na maioria das vezes as estruturas de madeira possuem suas superfícies expostas nas áreas internas das construções, e, portanto, além de cumprirem a função estrutural também são utilizadas como material de revestimento, é necessário que sejam conhecidas as propriedades relacionadas à reação ao fogo da madeira e dos produtos à base de madeira.

A reação ao fogo dos revestimentos indica a resposta dos materiais expostos ao fogo nos instantes iniciais de um incêndio. As principais características medidas são: o tempo para ignição, a velocidade de propagação das chamas, a taxa de emissão de calor e a produção de fumaça.

Usualmente, as limitações quanto ao uso de materiais de revestimentos são informadas pelos códigos de obras ou legislações dos bombeiros de cada país. No Brasil, por exemplo, a Instrução Técnica nº 10 [32] apresenta, em seus anexos, as classes de reação ao fogo permitidas

em função da ocupação do edifício e da finalidade do revestimento, conforme pode ser observado na Tabela 2.10.

Tabela 2.10: Classes de reação ao fogo de materiais de revestimento.

Ocupação	Finalidade do Material			
	Piso	Parede	Forro	Fachada
A	I, II-A, III-A, IV-A, V-A	I, II-A, III-A, IV-A	I, II-A, III-A, III-A	I, II-A, II-B
B, D, E, G, H	I, II-A, III-A, IV-A	I, II-A, III-A, III-A	I, II-A	
C-2, C-3	I, II-A, III-A, IV-A	I, II-A	I, II-A	

(Fonte: adaptada de [32]).

Alguns códigos de obras internacionais, como por exemplo o *International Building Code 2021* dos Estados Unidos [17] flexibilizam a classe de reação ao fogo caso sejam instalados chuveiros automáticos nas edificações. Nesses casos, existe uma maior permissibilidade uma vez que os chuveiros automáticos são eficazes no combate inicial de um incêndio, ou seja, no mesmo instante em que os materiais de revestimentos impactariam na segurança de edificação.

Para a classificação dos materiais de revestimento, os países da Europa se baseiam na norma EN 13501-1 [62]. O sistema europeu divide os materiais entre as classes A e F, sendo A os materiais incombustíveis e F os materiais extremamente combustíveis. A classificação europeia é detalhada na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Classes de reação ao fogo europeias.

Classes	Classe de fumaça	Gotejamento de material em chamas	Norma utilizada	FIGRA [W/s]	Exemplos de produtos
A1	-	-	-	-	Pedra e concreto
A2	s1, s2, s3	d0, d1, d2	EN 13823	≤ 120	Gesso acartonado e lâ de rocha
B	s1, s2, s3	d0, d1, d2	EN 13823 / ISO 11925-2	≤ 120	Madeira tratada com retardante de chamas
C	s1, s2, s3	d0, d1, d2	EN 13823 / ISO 11925-2	≤ 250	Gesso acartonado revestido
D	s1, s2, s3	d0, d1, d2	EN 13823 / ISO 11925-2	≤ 750	Madeira e produtos à base de madeira
E	-	d2	ISO 11925-2	-	Polímeros sintéticos
F	-	-	-	-	Materiais que não atingiram a classe E

(Fonte: adaptada de [63]).

As principais normas de ensaios utilizadas para a classificação dos materiais quanto à reação ao fogo são a EN 13823 [64], que apresenta as recomendações para a realização do ensaio conhecido como SBI (*Standard Burning Item*), e a EN ISO 11925-2 [65], que introduz o ensaio de ignitabilidade.

Adicionalmente, recomenda-se a realização do teste do painel radiante, apresentado pela norma EN ISO 9239-1 [66], para a classificação de revestimentos de piso.

O ensaio de SBI tem como resultado a medição dos seguintes itens: o índice da taxa de desenvolvimento de fogo (FIGRA); o índice da taxa de desenvolvimento de fumaça (SMOGRA); a liberação total de calor do material (THR); a produção total de fumaça (TSP); a propagação lateral de chama (LFS) e a ocorrência ou não de gotejamento e/ou desprendimento de material em chamas.

Complementando o ensaio de SBI, o ensaio de ignitabilidade informa o tempo (FS) em que a chama leva para atingir 150 mm de altura no corpo de prova ensaiado.

De acordo com a publicação da Comissão Europeia de 2005 [67], os produtos de madeira massiva com densidade superior a 380 kg/m³ são classificados como D-s2-d0. Portanto, o CLT possui os seguintes índices: FIGRA ≤ 750 W/s; SMOGRA ≤ 180 m²/s²; TSP ≤ 200 m²; FS ≤ 150 mm em 60 s e não há a ocorrência de gotejamento de partículas em chamas.

Compatibilizando os valores com a regulamentação brasileira, o CLT seria enquadrado na classe IV-A, tendo como base a Tabela 2.12 extraída da IT-10 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo [32].

Considerando a classificação indicada pela IT 10 [32], observa-se que os painéis de CLT não atendem aos requisitos para a utilização na maioria das classes de ocupação e finalidades de uso como material de revestimento.

Para que seja possível a adoção do produto de madeira massiva exposto, é necessário que sejam aplicados na superfície dos painéis produtos capazes de alterar a classe de reação ao fogo. De acordo com Anna-Lisa Östman, Schmid *et al.* [63], os retardantes de chamas encontrados no mercado são capazes de reduzir a classe de reação ao fogo da madeira para os critérios mais exigentes estabelecidos pelos códigos internacionais. Destaca-se, entretanto, que nenhum retardante de chamas transforma a madeira em um material incombustível. Diferente das pinturas e vernizes intumescentes, os retardantes de chama não devem ser considerados como revestimentos resistentes ao fogo.

Tabela 2.12: Caracterização dos materiais.

Classes		EN ISO 13823 (SBI)	EN ISO 11925-2 (Ignitabilidade)
I		Incombustível	Incombustível
II	A	FIGRA ≤ 120 W/s THR $\leq 7,5$ MJ SMOGR ≤ 180 m ² /s ² TPS ≤ 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
	B	FIGRA ≤ 120 W/s THR $\leq 7,5$ MJ SMOGR > 180 m ² /s ² TPS > 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
III	A	FIGRA ≤ 250 W/s THR ≤ 15 MJ SMOGR ≤ 180 m ² /s ² TPS ≤ 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
	B	FIGRA ≤ 250 W/s THR ≤ 15 MJ SMOGR > 180 m ² /s ² TPS > 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
IV	A	FIGRA ≤ 750 W/s SMOGR ≤ 180 m ² /s ² TPS ≤ 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
	B	FIGRA ≤ 750 W/s SMOGR > 180 m ² /s ² TPS > 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 60 s
V	A	FIGRA > 750 W/s SMOGR ≤ 180 m ² /s ² TPS ≤ 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 20 s
	B	FIGRA > 750 W/s SMOGR > 180 m ² /s ² TPS > 200 m ²	FS ≤ 150 mm em 20 s
VI		-	FS > 150 mm em 20 s

(Fonte: adaptada de [32]).

De acordo com Drysdale [35], os retardantes a base de fosfatos e boratos promovem um balanço de massas diferente do observado em peças não tratadas quando submetidas a um incêndio. Na nova configuração, por volta de 40% a 50% da madeira degradada se transforma em carvão, às custas da menor produção de alcatrão. Com menos emissão do material

inflamável, a quantidade de chamas é reduzida, contribuindo assim para a melhoria das características de reação ao fogo da madeira.

Em experimentos realizados em vigas de MLC tratadas por imersão em retardantes de chama, Martins [68] observou que os produtos são capazes de diminuir a taxa e carbonização das madeiras e, conseqüentemente, aumentar a resistência da estrutura em situação de incêndio. Provavelmente esse resultado foi obtido em função da formação de uma camada de carvão mais espessa do que normalmente ocorreria em madeiras não tratadas.

Observa-se que os retardantes de chamas podem se degradar ou até lixiviar quando expostos a altas umidades, o que ocorre especialmente em ambientes externos [63]. Nesses casos, o *Canadian Wood Council* [69] recomenda substituir a aplicação superficial pela impregnação do produto químico na madeira.

No caso da utilização de madeira impregnada, o departamento de agricultura dos Estados Unidos [70] observa que alguns produtos, como por exemplo os retardantes à base de boratos ou à base de cloretos de zinco, podem reduzir a resistência da madeira se utilizados em altas concentrações. Em alguns casos, a perda de resistência somente é observada a longo prazo.

Adicionalmente, observa-se que os retardantes de chamas a base de fosfatos são altamente corrosivos, especialmente na fase líquida (Figura 2.44). Portanto, são exigidos cuidados adicionais na aplicação do produto, evitando o contato com as ligações metálicas das estruturas de madeira. O *International Building Code* indica a proteção das conexões metálicas por meio de galvanização zincada das peças.

Figura 2.44 – Chapa metálica corroída por um retardante de chamas à base de fósforo.



(Fonte: próprio autor).

Um resumo sobre as informações referentes aos produtos citados nesse item pode ser lido na Tabela 2.13.

Tabela 2.13: Características dos retardantes e vernizes intumescentes.

Item	Retardante de chamas aplicado superficialmente	Retardante de chamas aplicado por impregnação	Verniz ou pintura intumescente aplicado superficialmente
Resistência da madeira em situação de incêndio	Não há impacto	Pode diminuir a taxa de carbonização, aumentando a resistência da madeira	Retarda o início da carbonização da madeira, aumentando a resistência do conjunto
Resistência da madeira em temperatura ambiente	Não há impacto	Alguns produtos diminuem a resistência mecânica da madeira	Não há impacto
Durabilidade	Não é permanente, mas é possível realizar a reaplicação. Pode se degradar em altas umidades.	Durabilidade maior do que aplicação superficial, mas não é possível realizar a reaplicação. Pode lixiviar em altas umidades.	Não é permanente, mas é possível realizar a reaplicação
Reação ao fogo	Melhora a performance	Melhora a performance	Melhora a performance
Corrosão	Pode ser corrosivo	Pode ser corrosivo	-

(Fonte: próprio autor e adaptada de [70]).

Finalmente, o *Canadian CLT Handbook* [34] observa que certos retardantes de chamas impregnados na madeira podem afetar os adesivos estruturais utilizados na fabricação dos produtos de madeira engenheirada.

2.5 Conclusões

A partir da revisão bibliográfica, é possível concluir que:

- A madeira é um excelente material para uso estrutural. Entre as características que a diferencia de outros materiais, é possível destacar a leveza e a alta relação entre a resistência mecânica e a densidade.
- As estruturas de madeira devem ser dimensionadas levando-se em consideração a ortotropia do material, o efeito do cisalhamento no cálculo dos deslocamentos, a umidade do ambiente, a temperatura, a duração do carregamento, entre outros.
- As limitações originadas pelas dimensões das toras das árvores são superadas pela industrialização da madeira. O processo industrial transforma os elementos de pequenas dimensões em peças estruturais capazes de atender às demandas complexas dos projetos de engenharia. Existem inúmeros produtos de madeira engenheirada,

muitos deles produzidos há mais de um século e alguns criados há poucas décadas, como é o exemplo dos painéis de CLT.

- Foram desenvolvidas uma série de normas sobre os painéis de CLT. Os principais documentos de engenharia apresentam diretrizes para o dimensionamento, para a produção e para o controle de qualidade na fabricação dos painéis engenheirados.
- Existem inúmeros métodos de cálculo de painéis de CLT. Embora seja simples, o Método Gama representa uma solução interessante para o dimensionamento de painéis unidirecionais. Para painéis bidirecionais, a opção mais adequada é considerar a teoria de placas de Reissner-Mindlin.
- O CLT foi incluído nos códigos de obras dos países europeus e da América do Norte, o que representa uma grande evolução para as construções de madeira ao redor do mundo. Nos Estados Unidos, é possível construir edificações em CLT de até 18 pavimentos, enquanto no Canadá, a limitação é de 12 pisos. Nos países europeus, em linhas gerais, é permitida a construção de edificações em madeira de até 30 metros de altura. O Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, se antecipando às demandas do setor, está desenvolvendo um expediente normativa que irá regulamentar a construção de edifícios de madeira no estado.
- As madeiras de coníferas mais utilizadas na construção civil iniciam o processo de carbonização aos 300 °C. Em linhas gerais, a taxa de carbonização é constante, com valores na ordem dos 0,65 mm/min. Apesar de não estar carbonizada, a madeira perde resistência e rigidez para temperaturas variando entre 60 e 300 °C. A camada de madeira afetada por temperaturas nessa ordem de grandeza é denominada de camada de resistência nula. O *Eurocode 5* indica, erroneamente, utilizar 7 mm de camada de resistência nula. Pesquisas indicaram que, em algumas situações, o valor pode ser o dobro. A revisão da norma europeia irá incluir essa correção.
- Os painéis de CLT possuem um comportamento em situação de incêndio diferente de peças de madeira serrada. O principal fator que impacta no comportamento do CLT é o tipo de adesivo estrutural utilizado na colagem das camadas de madeira. Adesivos PUR, não resistentes ao fogo, perdem a integridade para temperaturas na ordem dos 200 °C. Isso resulta na delaminação das tábuas de madeira antes de serem totalmente carbonizadas, fato mais preponderante em lajes do que em paredes. Nessas situações, deve-se considerar o método da carbonização bilinear. Usualmente, os adesivos estruturais MUF são resistentes ao fogo.

- A camada de resistência nula dos painéis de CLT leva em consideração o tipo de esforço solicitante.
- Para o dimensionamento de estruturas de CLT em situação de incêndio, considera-se o valor unitário para os coeficientes de modificação e de segurança. Adicionalmente, adota-se o vigésimo percentil para os valores de resistência.
- Existem curvas de incêndio paramétricas que levam em consideração a influência dos painéis de CLT no desenvolvimento de um incêndio real. Nessas situações, a taxa de carbonização é calculada de maneira iterativa. As curvas de incêndios parametrizados, quando consideram a carga térmica proveniente da madeira estrutural, resultam em temperaturas e tempos superiores às curvas que desprezam a combustibilidade do material estrutural, o que resulta na maior severidade dos incêndios.
- A auto extinção de um incêndio de uma estrutura de CLT só é viável caso a transferência de calor entre os elementos estruturais seja limitada. Uma das maneiras de se controlar esse aspecto, é mantendo uma distância mínima entre os elementos estruturais de madeira expostos ao fogo. Adicionalmente, a delaminação dos painéis de CLT pode inviabilizar a auto extinção do fogo de uma estrutura de madeira. Observa-se que, caso ocorram sucessivos deslocamentos, o painel tende a ser completamente consumido pelo fogo.
- As estruturas de CLT são capazes de compartimentar ambientes em situação de incêndio. Para tanto, as juntas entre painéis devem ser vedadas com selantes corta-fogo, impedindo a passagem de fumaça através das aberturas.
- As conexões metálicas são o ponto frágil das estruturas de madeira em situação de incêndio. As conexões expostas diretamente ao fogo são capazes de resistir a no máximo 30 minutos de um incêndio padrão. Portanto, as conexões devem ser protegidas com materiais resistentes ao fogo, tais como placas de gesso acartonado ou peças de madeira.
- Os painéis de CLT de madeira de conífera são enquadrados na classe de reação ao fogo IV-A. Portanto, para que seja possível adotar os painéis expostos diretamente ao fogo na maioria das classes de ocupação, é necessário que seja aplicado um retardante de chamas para o reenquadramento do produto. Os retardantes de chamas não transformam a madeira em um material incombustível e nem aumentam a capacidade resistente do material em situação de incêndio. Alguns retardantes de chamas são

corrosivos em sua fase líquida, portanto, devem ser aplicados em ambiente fabril fora do contato com as conexões. Os retardantes de chamas aplicados superficialmente podem se degradar ou lixiviar quando expostos às intempéries. Portanto, em ambientes externos, recomenda-se a adoção de retardantes de chamas impregnados na madeira.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios que serão apresentados neste capítulo fazem parte do plano de pesquisa e desenvolvimento liderado e financiado pela empresa Amata Urbem com o intuito de desenvolver o mercado da construção civil em madeira massiva no Brasil.

A Amata é uma empresa florestal brasileira que atua há mais de 15 anos na conservação de florestas em todo o território nacional, com atividades que variam do manejo sustentável em áreas de florestas nativas na região da Amazônia ao reflorestamento de áreas degradadas a partir do plantio de árvores de pinus e de eucalipto no Paraná e no Mato Grosso do Sul, respectivamente.

Em 2017, com o objetivo de valorizar seus ativos florestais, a Amata iniciou um processo de expansão de suas atividades para a área industrial, a partir da elaboração e implementação de um projeto de indústria capaz de produzir 100.000 m³ por ano de produtos de madeira engenheirada, sendo 50.000 m³ de CLT e 50.000 m³ de MLC. Ao projeto industrial, foi dado o nome de Urbem.

Nos últimos anos, a empresa tem investido em pesquisas, auxiliado no desenvolvimento e criação de normas e legislações voltadas à área, criado cadernos com detalhes técnicos para os projetistas, desenvolvido softwares de projeto de estruturas de madeira (ver Apêndice A), participado da realização de ensaios de desempenho de produtos de madeira engenheirada, realizado ensaios de durabilidade de seus produtos, realizado ensaios de caracterização mecânica de painéis de CLT fabricados com pinus brasileiro e, por fim, realizado ensaios de resistência e de reação ao fogo em amostras de CLT e de MLC, visando a implementação de sua indústria no país.

Neste capítulo do trabalho, serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais de resistência ao fogo em amostras de CLT em escala natural de construção, conforme metodologia apresentada pela ABNT NBR 5628: 2001 Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo [33].

No total, foram realizados dois testes de resistência ao fogo em placas de CLT, sendo o primeiro um ensaio de uma amostra de laje do painel de madeira massiva e o segundo um teste de uma parede de CLT.

Para avaliação dos elementos estruturais em situação de incêndio, a norma brasileira prevê a utilização do programa térmico definido pela curva-padrão “temperatura x tempo”, também adotado pela norma ISO 834 [37], conforme Equação 28 e Figura 3.1.

$$\theta - \theta_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (28)$$

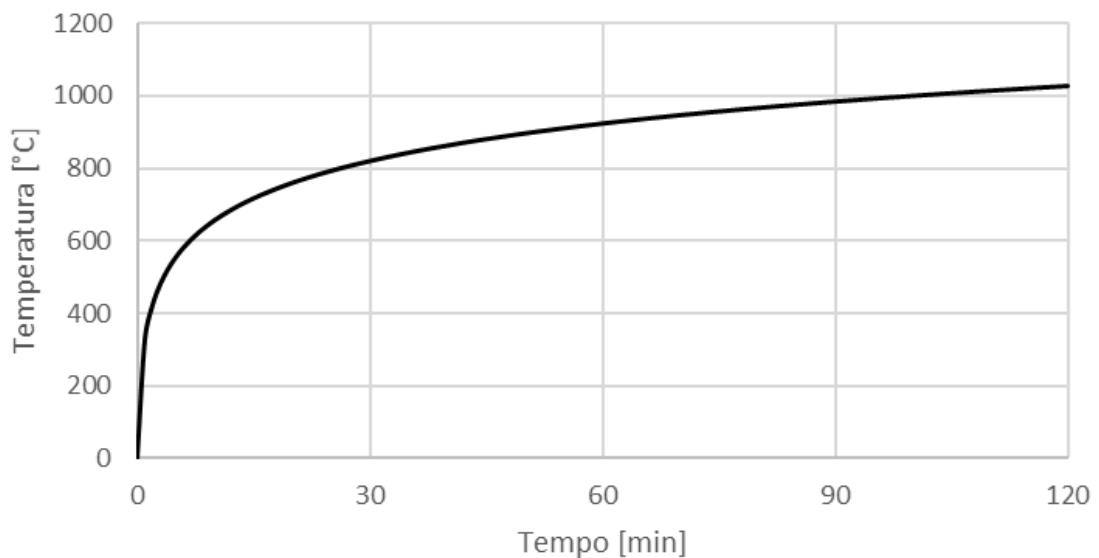
Onde:

θ = temperatura no forno em °C no instante t ;

θ_0 = temperatura inicial do forno em °C, limitada a valores entre 10 °C e 40 °C;

t = tempo em minutos.

Figura 3.1 – Curva de incêndio-padrão ISO 834.



(Fonte: adaptada de [29]).

Os ensaios têm como objetivo avaliar os seguintes itens:

- manutenção da estanqueidade;
- manutenção do isolamento térmico;
- manutenção da capacidade resistente;

Adicionalmente, propõe-se avaliar:

- a taxa de carbonização dos painéis de CLT;
- a ocorrência de deslocamento das lamelas do painel engenheirado;
- o perfil de temperatura através das amostras.

A NBR 5628 prevê a realização do ensaio em duas etapas. Na primeira, deve-se aplicar o carregamento sobre as amostras posicionadas no forno de modo que sejam originados esforços de mesma magnitude dos observados nas edificações correntes.

Na sequência, a peça estrutural deve ser aquecida de acordo com o programa térmico citado anteriormente durante um tempo preestabelecido ou até a sua ruína. Em caso de colapso nessa etapa, admite-se que a amostra resiste apenas a 80% do tempo de aquecimento.

No caso de a amostra não colapsar, inicia-se a segunda fase do ensaio. Inicialmente, deve-se retirar o carregamento da peça e deixá-la esfriar naturalmente durante 24 horas. Após esse período, o carregamento deve ser reaplicado para verificação da manutenção da capacidade resistente e dos deslocamentos ou deformações da estrutura. Em caso de ruína na reaplicação do carregamento, adota-se 80% do tempo de aquecimento como valor de capacidade resistente da amostra.

Durante o período de aquecimento, a estanqueidade do sistema deve ser verificada a partir da ignição de um chumaço de algodão (100 mm x 100 mm x 20 mm) posicionado a uma distância de 3 cm da superfície não exposta ao fogo. Caso a fibra natural não se inflame, o sistema é considerado impermeável à passagem de chamas e gases quentes.

Nesse mesmo período, o isolamento térmico deve ser verificado por meio da medição da temperatura em cinco pontos da superfície da amostra não exposta ao fogo, sendo um deles no centro do elemento estrutural e os demais no centro dos quatro quadrantes da amostra. Nenhum ponto deve superar o valor de 180 °C e a temperatura média dos cinco pontos deve ser inferior a 140 °C.

A manutenção da capacidade resistente é verificada de duas formas. Caso a amostra sofra ruptura durante qualquer uma das etapas do ensaio ou apresente um deslocamento transversal maior do que os limites estipulados para cada elemento estrutural, considera-se a inutilização do componente. No caso de lajes, o deslocamento transversal máximo é igual a $L/30$. No caso de paredes, não há um limite de deslocamentos ou de deformações pré-estipulado pela norma brasileira.

É importante destacar que a verificação da manutenção da capacidade resistente da amostra 24 horas após o desligamento dos queimadores é um método de avaliação prescrito apenas pela normalização brasileira. As normas internacionais [37; 71], compreendendo as diferenças entre o comportamento de incêndios naturais e de incêndios padronizados, de

maneira apropriada, consideram apenas a fase de aquecimento do teste para analisar as amostras, desprezando a longa e desnecessária curva de resfriamento dos ensaios de incêndio estipulada pela norma brasileira.

3.1 Ensaio de resistência ao fogo de uma laje de CLT

3.1.1 Detalhamento das amostras

Foi realizado um ensaio de resistência ao fogo em uma laje de CLT de 350 cm de largura por 500 cm de comprimento. A amostra de laje foi produzida a partir da união lateral do tipo “meia madeira” de dois painéis idênticos de CLT fabricados pela empresa austríaca K LH.

As placas possuíam 175 cm de largura, 500 cm de comprimento e 13 cm de espessura distribuídos em 5 camadas (3cm – 2cm – 3cm -2cm -3cm), conforme ilustrado pela Figura 3.2. A fabricante produziu os painéis a partir da união de lamelas de abeto (*Picea abies*) coladas com adesivo estrutural a base de poliuretano (PUR), não resistente ao fogo [3]. Apesar desse tipo de adesivo não ser permitido em algumas jurisdições, como é o caso dos países da América do Norte [20], é amplamente utilizado na Europa [21].

Figura 3.2 - Amostras de painéis de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Na união entre painéis, com o objetivo de selar a junta, foi aplicado o silicone *firestop* INSS2460 (Figura 3.3) da empresa CKC do Brasil. Para unir as placas, foram utilizados

parafusos auto perfurantes do tipo HBS 6x100 (Figura 3.4) do fabricante italiano Rothoblaas Srl, espaçados a cada 10 cm a um ângulo de 90° com o plano horizontal.

Figura 3.3 – Firestop.



(Fonte: CKC [72]).

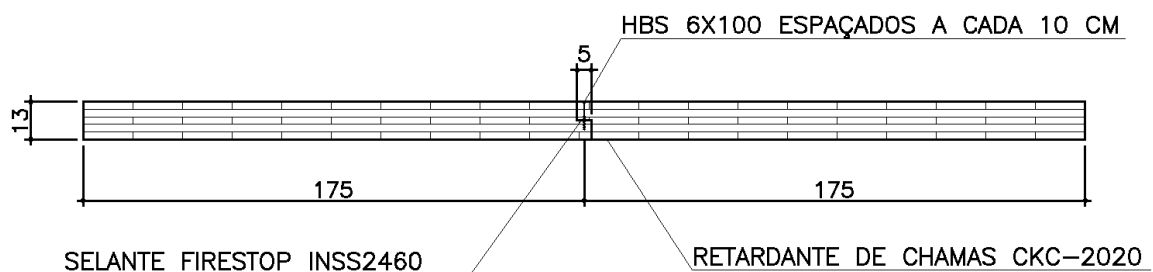
Figura 3.4 - Parafusos auto perfurantes.



(Fonte: Rothoblaas [73]).

Com o objetivo de simular em laboratório as condições observadas em projetos reais de estruturas de madeira, foram aplicadas 3 demãos do retardante de chamas CKC-2020 (100 ml / m² x demão) da empresa CKC do Brasil na face da laje exposta ao fogo, conforme ilustrado pela Figura 3.5. De acordo com o fabricante, a aplicação superficial do retardante de chamas nas especificações citadas anteriormente, seria capaz de alterar a classe de reação ao fogo da madeira de IV-A para II-A, possibilitando a exposição do CLT no forro ao enquadrar o produto de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas regulamentações dos bombeiros [32].

Figura 3.5 – Seção transversal da amostra.



(Fonte: próprio autor).

3.1.2 Carregamento sobre os painéis de CLT

A norma brasileira recomenda que o carregamento aplicado no ensaio origine esforços de mesma ordem de grandeza das edificações correntes. Para tanto, a laje foi submetida a um

carregamento constante de 3 kN/m^2 , simulando a sobrecarga de utilização de um edifício comercial, distribuído em dois reservatórios de água posicionados na face superior da laje.

Entre os reservatórios e os painéis de CLT, foram posicionadas duas placas de gesso acartonado para evitar o aquecimento dos reservatórios de água durante o ensaio, conforme ilustrado pela Figura 3.6.

Figura 3.6 – Amostra com carregamento.

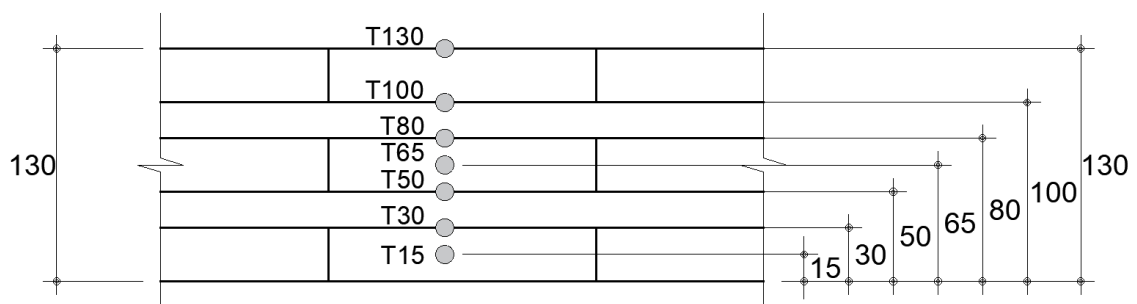


(Fonte: próprio autor).

3.1.3 Instrumentação para medição de temperatura e dos deslocamentos

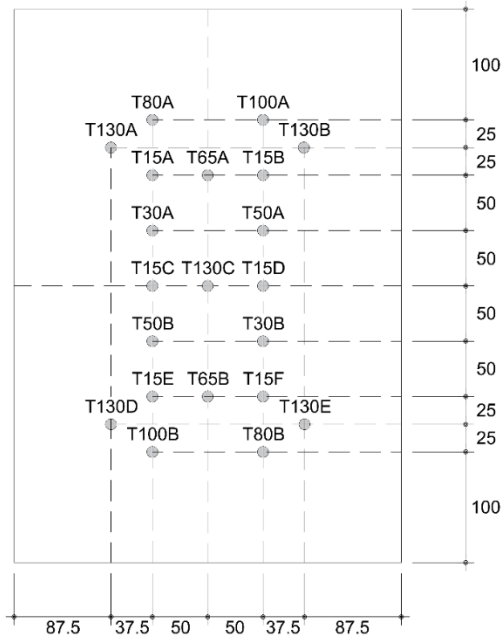
Para medição das temperaturas internas das placas de CLT, foram instalados perpendicularmente às isotermas 16 termopares do tipo K (precisão de $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) do fabricante Consistec. Com relação à verificação do isolamento térmico, foram instalados 5 termopares de mesmo tipo na face superior da placa de madeira, fixados no centro de um disco de cobre, conforme estabelecido pela norma brasileira. A distribuição e instalação dos termopares ocorreu de acordo com as Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

Figura 3.7 – Distribuição dos termopares ao longo da seção transversal em *mm*.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.8 - Distribuição dos termopares em planta em *cm*.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.9 - Foto da instalação de um termopar no painel de CLT.



(Fonte: próprio autor).

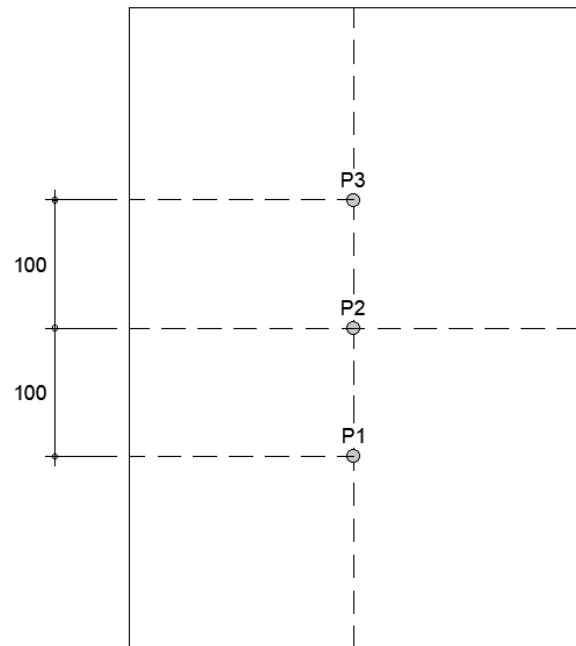
Para a medição dos deslocamentos, foram instalados entre a ponte rolante e a laje 3 transdutores do tipo fio (precisão de 0,001 mm) da marca Vishay, conforme ilustrado pelas Figuras 3.10 e 3.11.

Figura 3.10 - Fixação dos transdutores na laje de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.11 - Distribuição dos transdutores em planta em *cm*.



(Fonte: próprio autor).

3.1.4 Forno horizontal

Para realização do ensaio, foi utilizado o forno horizontal instalado no Laboratório de Estruturas (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) no *campus* de São Carlos (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Forno horizontal.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.13 – Válvulas do forno



(Fonte: próprio autor).

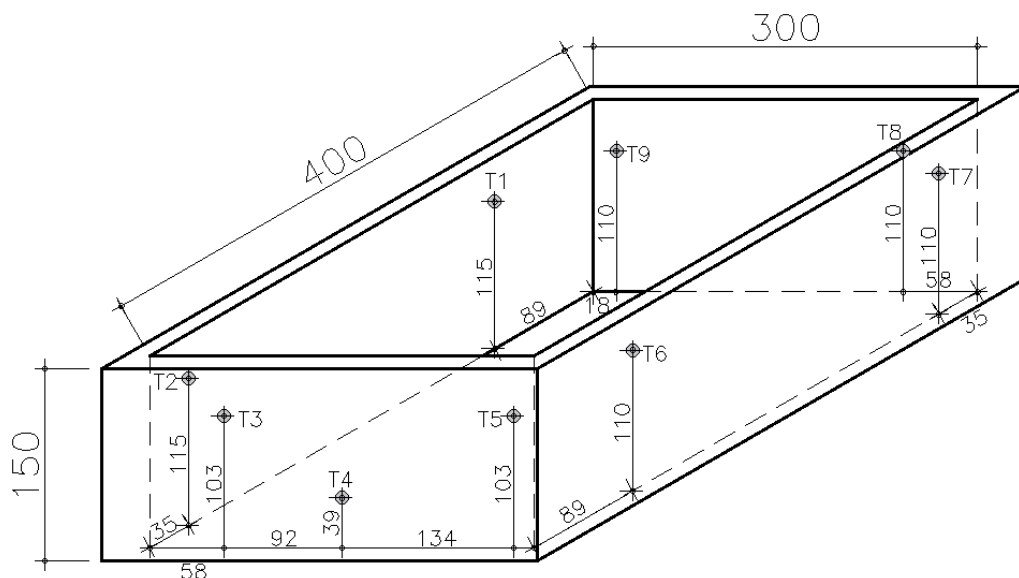
Figura 3.14 - Termopares conectados ao painel de controle.



(Fonte: próprio autor).

Como características principais, o forno possui largura de 300 cm, comprimento de 400 cm e altura de 150 cm, é equipado por oito válvulas (Figura 3.13) que conectam os queimadores a gás ao painel elétrico de controle de temperatura (Figura 3.14), além de possuir um sistema de exaustão para liberar a fumaça produzida durante o ensaio. O forno possui 9 termopares (precisão de 0,01 °C) acoplados ao equipamento, responsáveis pela medição da temperatura interna do forno, conforme representado pela Figura 3.15.

Figura 3.15 – Distribuição dos termopares no forno.



(Fonte: próprio autor).

3.1.5 Duração do ensaio

Conforme orientação da NBR 5628, a amostra deve ser aquecida até que ocorra a inutilização do elemento estrutural ou até um tempo preestabelecido. Para este ensaio, estipulou-se um tempo de aquecimento de 30 minutos, de sorte que apenas a primeira lamela do painel fosse carbonizada e que as linhas de cola do CLT permanecessem com temperaturas abaixo do valor de delaminação (200 °C), possibilitando, dessa forma, a realização do ensaio de 24 horas sem a interferência do deslocamento das lamelas.

3.2 Ensaio de resistência ao fogo de uma parede de CLT

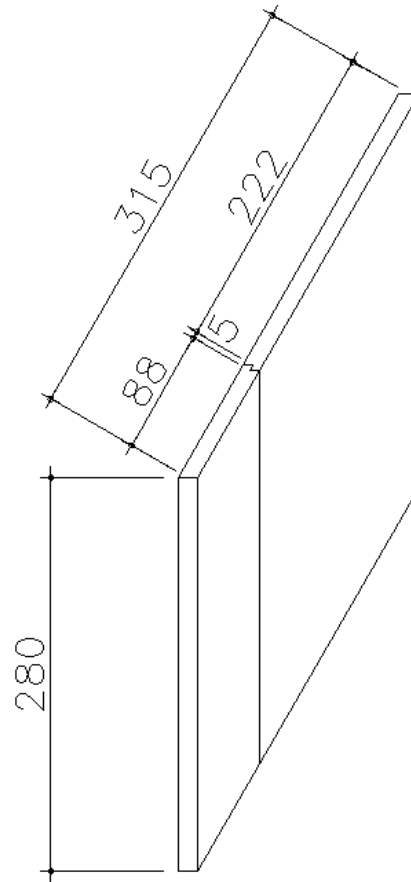
3.2.1 Detalhamento das amostras

Foi realizado um ensaio de resistência ao fogo em uma parede de CLT de 315 cm de comprimento, 280 cm de altura e 14 cm de espessura, distribuídos em 5 lamelas (4cm – 2cm – 2cm – 2cm – 4cm).

A amostra de parede foi produzida a partir da união vertical do tipo “meia madeira” de dois painéis de CLT, sobrepostos em 5 cm no comprimento da parede. O primeiro painel possuía 93 cm de comprimento por 280 cm de altura, enquanto o segundo painel possuía 227 cm de comprimento por 280 cm de altura (Figura 3.16). As amostras foram confeccionadas no Brasil a partir da usinagem de um *masterpanel* de 227 cm por 1180 cm (Figura 3.17).

O painel de CLT foi produzido pela empresa austríaca KLH a partir da união de lamelas de pinus (*Pinus spp*), coladas por meio de um adesivo estrutural do tipo PUR, não resistente ao fogo. As tábuas de madeira foram tratadas por impregnação em autoclave na Europa antes da colagem das mesmas para a produção do painel de CLT com o produto hidrossolúvel conhecido como *Impralit KDS-B*. Tal produto, amplamente utilizado na Europa, preserva a madeira contra ataques de térmitas, fungos apodrecedores e brocas. Utilizou-se uma retenção de 5 kg/m³ do ingrediente ativo do produto químico. Segundo o fabricante, observa-se que a empresa ainda não possui certificação para a produção e comercialização de CLT de pinus tratado utilizando adesivos estruturais resistentes ao fogo. Por ora, a certificação atende apenas a produção de painéis com adesivo resistente ao fogo para madeira não tratada em autoclave.

Figura 3.16 - Vista isométrica da parede de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.17 – *Masterpanel* para a confecção das amostras de parede de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Para evitar a passagem de fumaça através da junta entre os painéis, aplicou-se o selante *firestop* INSS2460 da CKC. As placas foram unidas por meio de parafusos auto perfurantes HBS 6x130 da Rothoblaas, espaçados a cada 10 cm. Na face da parede exposta ao calor, foram aplicadas 3 demãos do retardante de chamas CKC-2020 a uma concentração de 100 ml/m² por demão do produto, aproximando a amostra ensaiada à situação real de projeto.

3.2.2 Carregamento sobre a parede de CLT

Sobre a amostra de CLT, foi aplicado um carregamento vertical de 80 kN/m, simulando uma parede externa de um edifício comercial de aproximadamente 8 pavimentos. O carregamento foi aplicado por meio de um sistema hidráulico acoplado ao pórtico metálico que sustenta a parede de CLT.

3.2.3 Instrumentação para medição de temperatura e dos deslocamentos

Para a verificação do isolamento térmico da parede de CLT, foram instalados 5 termopares do tipo T (precisão de 0,01 °C) do fabricante Thermomax na face externa dos painéis. Nesse ensaio, não foram instalados termopares intermediários no interior das placas para avaliação do perfil de temperaturas durante o teste. A distribuição dos termopares pode ser observada na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Distribuição dos termopares na parede de CLT.



(Fonte: próprio autor).

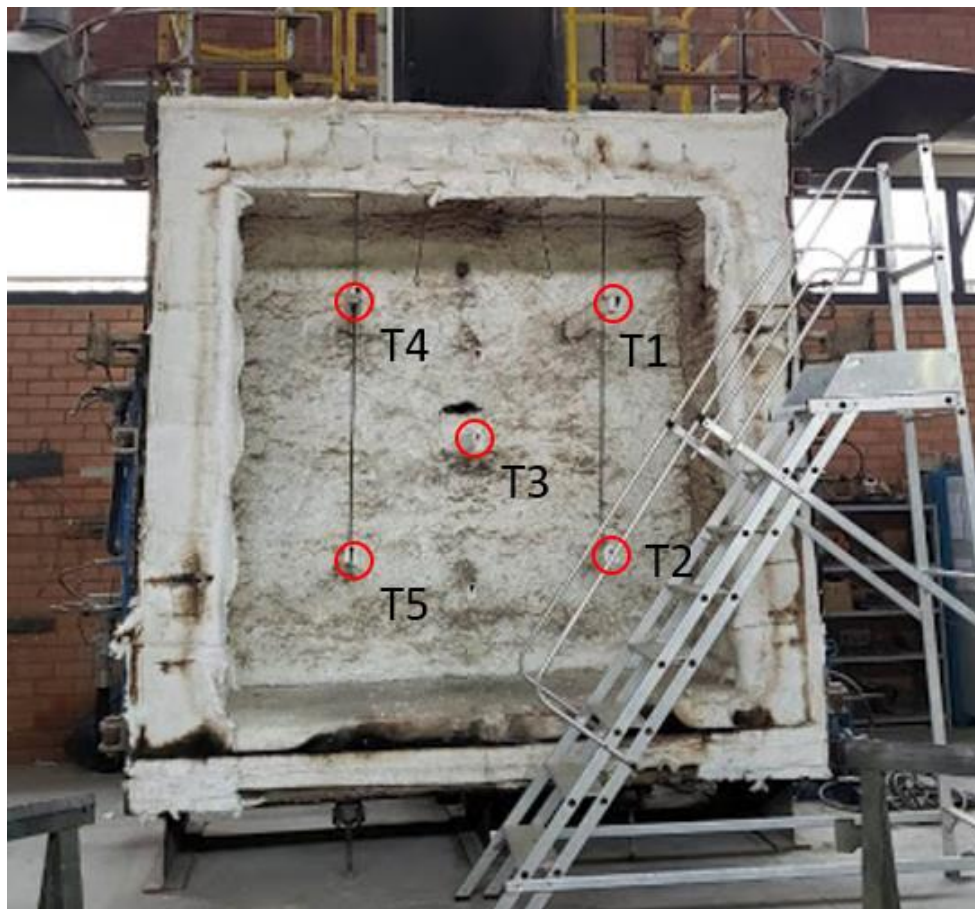
Para a medição dos deslocamentos horizontais no centro da parede, utilizou-se uma trena a laser (precisão de 0,001 m) da Bosch posicionada perpendicularmente à amostra a uma distância de aproximadamente 4 metros da parede.

3.2.4 Forno vertical

Para a realização do ensaio de resistência ao fogo da parede de CLT, foi utilizado o forno vertical do Laboratório de Segurança Contra Incêndio (LSCI) da itt Performance do Instituto Tecnológico da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), localizado na cidade de São Leopoldo, região metropolitana de Porto Alegre.

O forno possui cinco termopares internos (precisão de 0,01 °C) para a medição das temperaturas durante o ensaio (Figura 3.19). Além disso, o equipamento é instrumentado com quatro queimadores a gás, responsáveis pela elevação de temperatura no decorrer do teste (Figura 3.20). A superfície de parede exposta ao fogo compreende uma área de 250 cm por 250 cm.

Figura 3.19 – Vista dos termopares internos do forno vertical.



(Fonte: próprio autor).

Figura 3.20 – Vista dos queimadores a gás.



(Fonte: próprio autor).

3.2.5 Duração do ensaio

As amostras de parede de CLT foram submetidas a 60 minutos do programa térmico-padrão. Dois motivos explicam a escolha do tempo de ensaio:

- em um edifício comercial de 8 pavimentos, conforme pretende-se simular, a altura do último piso habitado seria de aproximadamente 21 metros. Para essa altura e classe de ocupação, a regulamentação de incêndio do Estado de São Paulo [31] prevê um TRRF de 60 minutos;
- considerando que a lamela externa da parede ensaiada possuía 40 mm de espessura, ao realizar um ensaio de 60 minutos, esperava-se que a primeira linha de cola fosse afetada por temperaturas superiores à temperatura de delaminação (200 °C). Dessa maneira, as informações extraídas do ensaio de parede complementam às obtidas por meio da realização do teste de resistência ao fogo da laje de CLT.

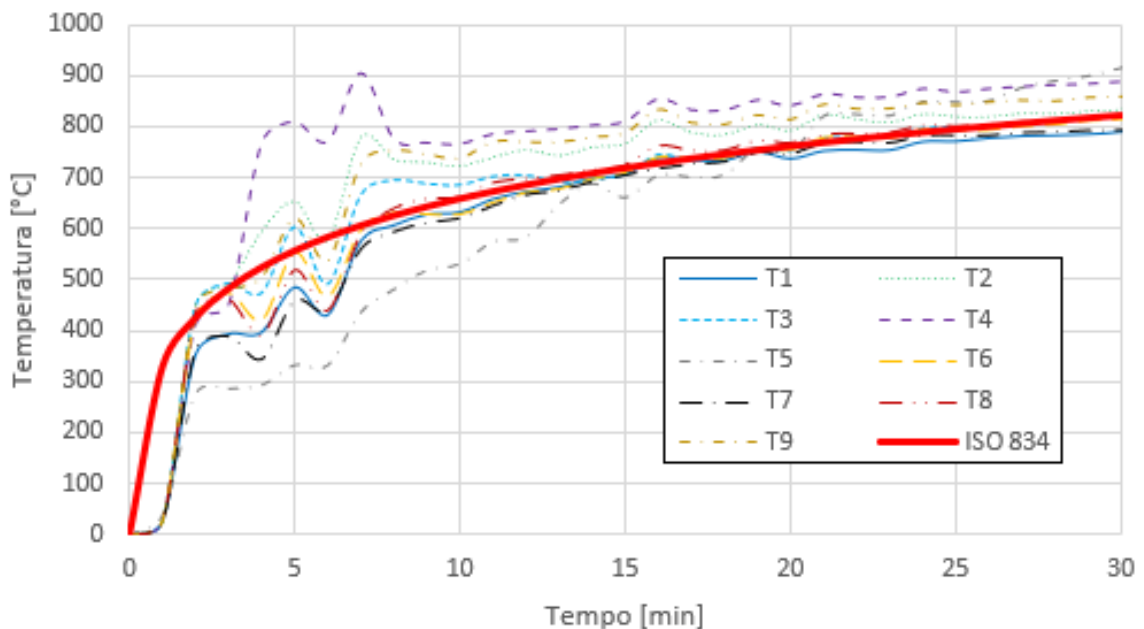
4 RESULTADOS

4.1 Resultados do ensaio de painéis de lajes de CLT

Conforme descrito com mais detalhes na metodologia do trabalho, foram extraídos do ensaio dados para analisar a estanqueidade, o isolamento térmico, a resistência estrutural, a taxa de carbonização, a ocorrência de deslocamentos e o fluxo de temperatura através dos painéis de CLT submetidos ao incêndio-padrão.

Em função dos resultados dependerem da correta aplicação da curva de incêndio-padrão ISO 834, propõe-se comparar as temperaturas dos nove termopares instalados no interior do forno com a curva padronizada, conforme ilustrado pela Figura 4.1.

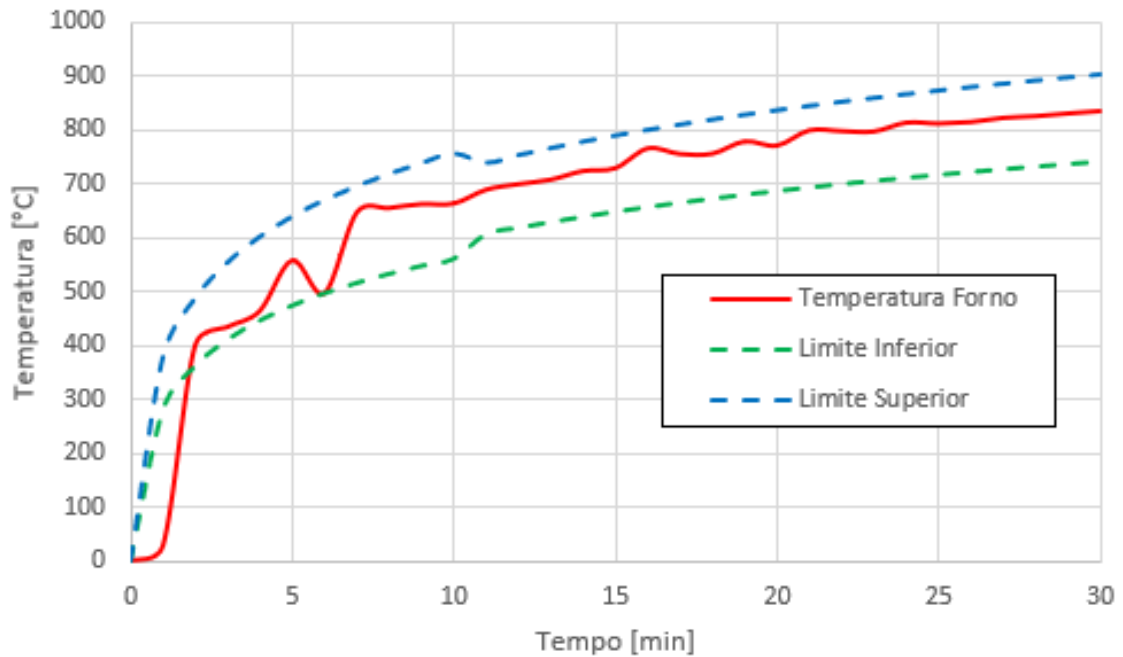
Figura 4.1 – Comparativo entre a curva ISO 834 e temperaturas internas do forno.



(Fonte: próprio autor).

Considerando a média de temperaturas dos termopares T1 a T9 acompanhado pelas tolerâncias de temperaturas máximas e mínimas indicadas pela NBR 5628 ($\pm 15\%$ durante os primeiros 10 minutos e $\pm 10\%$ entre 10 e 30 minutos de teste), observa-se que, apesar da oscilação ocorrida nos primeiros 2 minutos de ensaio, o teste acompanhou o programa térmico preestabelecido (Figura 4.2). Observa-se que a pequena oscilação inicial é natural e está relacionada à homogeneização da temperatura interna do forno.

Figura 4.2 - Comparativo entre a temperatura média do forno e os limites de norma.



(Fonte: próprio autor).

4.1.1 Estanqueidade

Nos minutos iniciais do ensaio, observou-se a passagem de fumaça em pequena quantidade através da emenda entre painéis de CLT e o forno (Figura 4.3). Entretanto, não ocorreu ignição do chumaço de algodão posicionado próximo à emenda entre painéis (Figura 4.4). Após 10 minutos, a corrente de gases cessou.

Figura 4.3 - Passagem de fumaça entre o painel de CLT e a parede do forno.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.4 - Verificação da ignição do chumaço de algodão na emenda entre painéis.



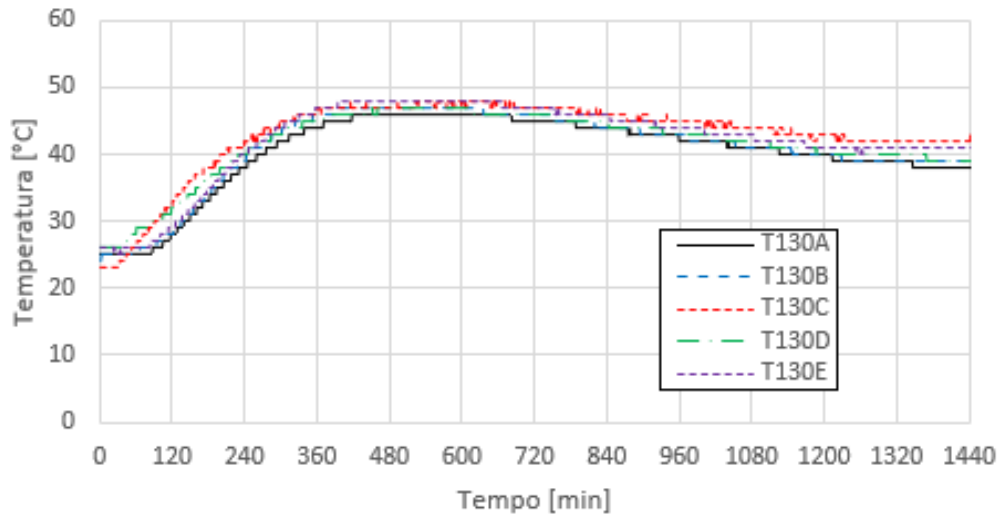
(Fonte: próprio autor).

4.1.2 Isolamento térmico

Durante o período de 30 minutos de programa térmico ativo, não ocorreu alteração na temperatura da superfície do CLT não exposta ao fogo. Entretanto, ao longo das 24 horas de

ensaio, a temperatura medida pelos termopares da série T130 se aproximou dos 50 °C, conforme apresentado pela Figura 4.5.

Figura 4.5 – Temperatura na face não exposta ao fogo.

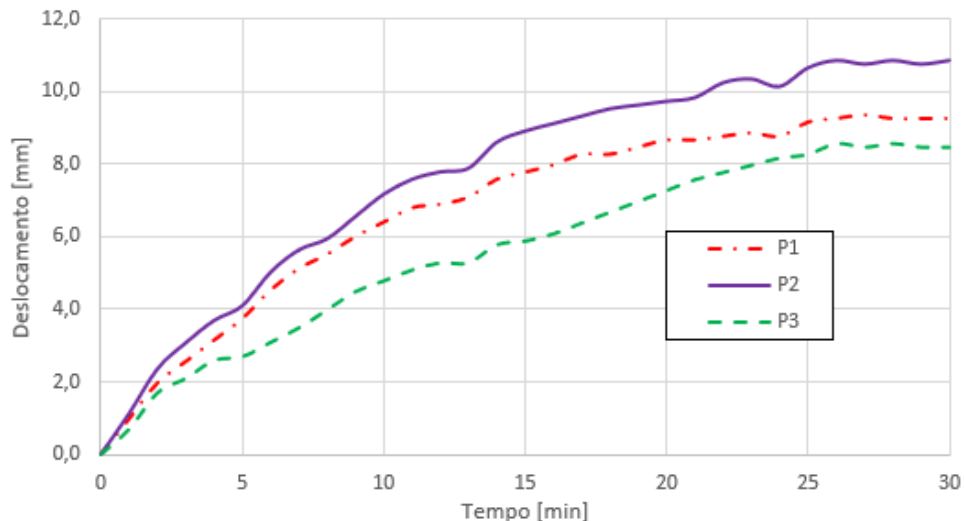


(Fonte: próprio autor).

4.1.3 Deslocamentos

No decorrer da primeira fase do ensaio, os deslocamentos medidos pelos transdutores com o painel carregado foram medidos e estão representados na Figura 4.6. Os transdutores foram “zerados” com os painéis de CLT carregados, ou seja, os deslocamentos nulos representam a posição deformada dos painéis de CLT em função do peso próprio das placas e do carregamento dos reservatórios de água, no instante em que antecedeu a ignição dos queimadores a gás. Ou seja, os deslocamentos são relativos e não absolutos.

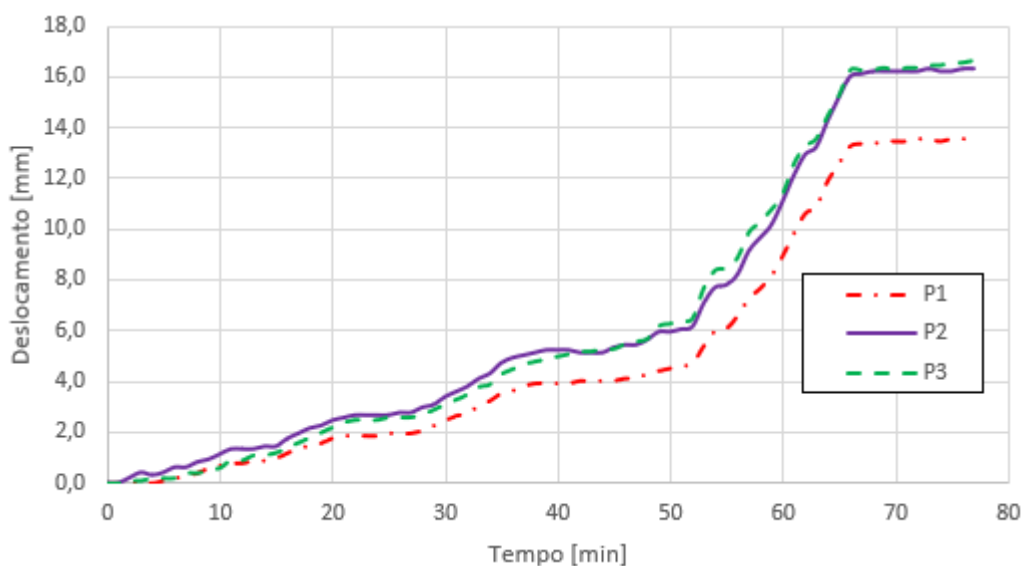
Figura 4.6 – Deslocamentos na primeira fase do ensaio.



(Fonte: próprio autor).

Observa-se que há um acréscimo dos deslocamentos em função da redução da inércia dos painéis de CLT, uma vez que uma parcela da seção transversal foi consumida pelo fogo dos primeiros 30 minutos de teste. Os reservatórios de água foram esvaziados 120 minutos após o início da primeira fase do ensaio. Após 24 horas do desligamento dos queimadores, o painel de CLT foi novamente carregado com $3,0 \text{ kN/m}^2$ de água, numa fase que durou aproximadamente 66 minutos. O perfil de deslocamentos encontrado durante o carregamento pode ser observado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Deslocamentos na fase de reaplicação do carregamento vertical.

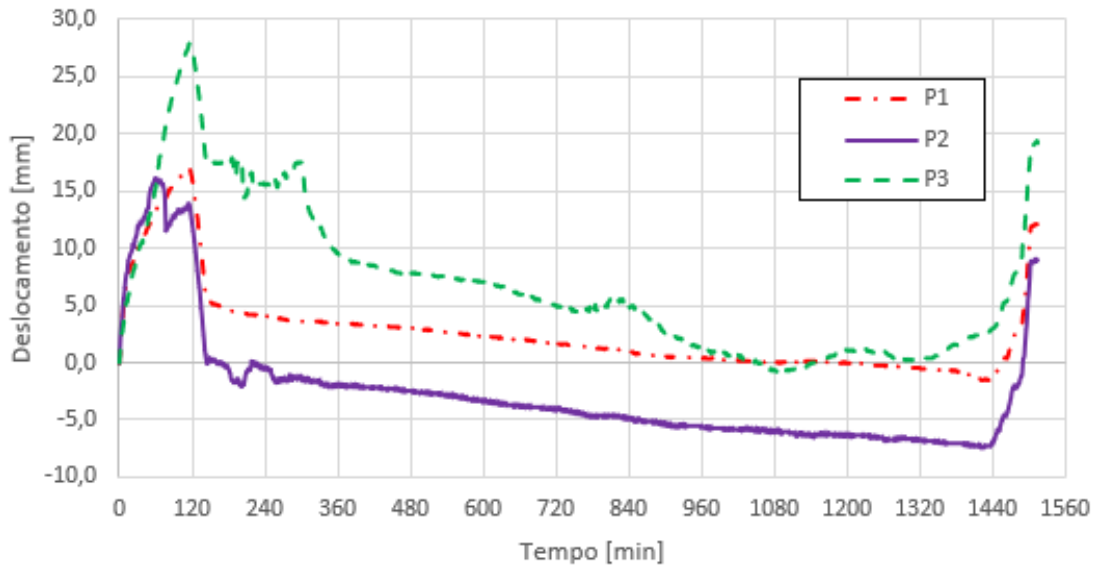


(Fonte: próprio autor).

Nota-se que, após a reaplicação total da carga, os deslocamentos se mantiveram constantes. É importante destacar que os valores de deslocamentos apresentados na Figura 4.7 são relativos à posição em que os 3 pontos de medição se encontravam no instante anterior à reaplicação do carregamento.

A Figura 4.8 ilustra os deslocamentos apontados pelos 3 transdutores ao longo das 24 horas de ensaio, novamente considerando os instrumentos “zerados” com a laje totalmente carregada. Observa-se que, mesmo após o desligamento dos queimadores, o deslocamento transversal do painel seguiu aumentando até o instante em que os reservatórios foram esvaziados. Esse comportamento ocorreu devido à carbonização lenta da madeira e da perda de rigidez do painel em função do aumento de temperatura das lamelas centrais, conforme será abordado nos próximos itens do trabalho. Adicionalmente, é possível notar que ocorreu um erro de medição dos deslocamentos referentes ao transdutor central (P2) aos 70 minutos.

Figura 4.8 – Deslocamentos ao longo de todo o ensaio.

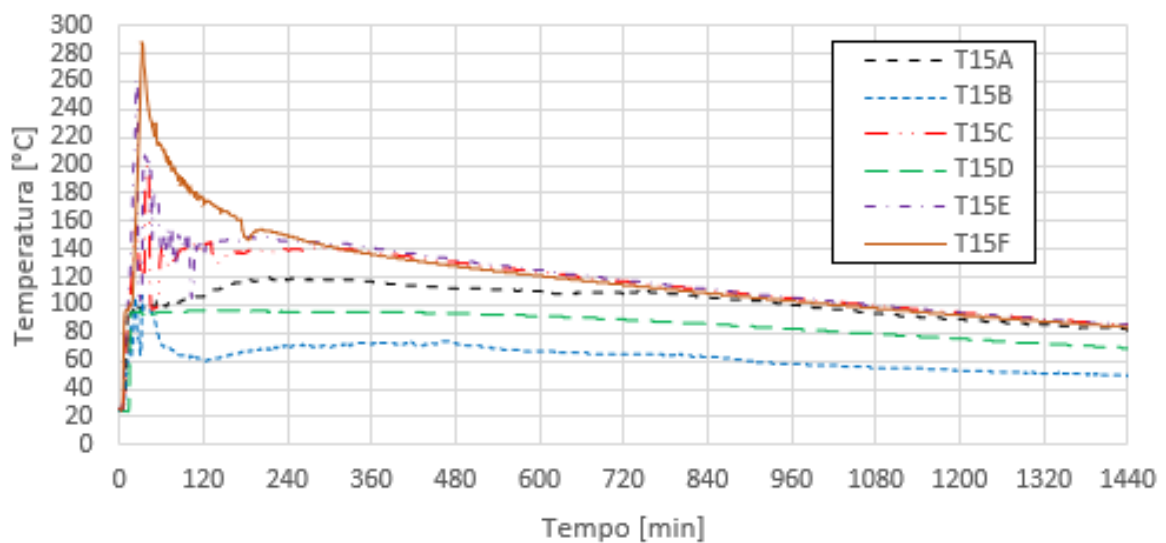


(Fonte: próprio autor).

4.1.4 Espessura da camada carbonizada

Durante a realização do ensaio, a velocidade de queima da madeira foi verificada por meio das medições de temperatura no interior do CLT. Admite-se a carbonização da madeira para temperaturas próximas aos 300 °C. De acordo com Schmid, Klippel *et al.* [74], utilizar a temperatura para determinar a espessura de carvão é um processo frequentemente utilizado em análises de ensaios de incêndio de estruturas de madeira. Os termopares mais próximos da face exposta ao fogo, da série T15, apresentaram o comportamento conforme Figura 4.9.

Figura 4.9 – Temperatura nos termopares T15.



(Fonte: próprio autor).

Observa-se que as máximas temperaturas medidas nos termopares T15E e T15F se aproximaram da isoterma de 300 °C (262 °C e 287 °C, respectivamente), indicando a carbonização da lamela exposta ao fogo em pelo menos 15 mm de espessura. Os demais termopares dessa série não apresentaram medições confiáveis.

Após a realização do ensaio, a espessura carbonizada dos painéis de CLT foi determinada indiretamente a partir da medição manual das espessuras residuais virgens de um dos painéis de 175 cm x 500 cm. A determinação da espessura de madeira carbonizada seguiu o seguinte procedimento:

1 – Um dos painéis de CLT foi cortado em 21 pedaços no sentido transversal, sendo os pedaços extremos cortados com aproximadamente 35 cm de largura e as outras 19 peças cortadas com aproximadamente 22,5 cm de largura (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Pannel de CLT cortado em 21 peças.



(Fonte: próprio autor).

2 – As laterais das peças foram demarcadas com um giz a cada 10 cm com o auxílio de uma trena, formando uma malha de 10 cm x 22,5 cm nas peças centrais carbonizadas (Figura 4.11). Portanto, cada ponto marcado no centro dessa região representa uma área de 225 cm².

3 – As peças foram posicionadas sobre uma mesa plana, o carvão residual foi removido da região de demarcação dos pontos da malha e as seções de madeira virgem foram medidas com o auxílio de um esquadro e de um paquímetro (Figuras 4.12 e 4.13).

Figura 4.11 - Peça de CLT posicionada sobre a mesa para demarcação da malha.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.12 - Medição da seção residual com o auxílio de um esquadro.



(Fonte: próprio autor).

4 – Todas as medições de espessura de madeira virgem foram registradas em uma tabela. Ao todo, foram medidos 396 pontos, sendo 270 localizados na região onde ocorreu a carbonização da madeira e 126 pontos posicionados em áreas não afetadas pelo fogo. A Figura 4.14 ilustra todas as medições.

Figura 4.13 - Medição da seção residual com auxílio de um paquímetro.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.14 - Malha representando a espessura residual virgem do painel de CLT em *cm*.

Coordenadas [cm]	0	35	58	80	103	125	148	170	193	215	238	260	283	305	328	350	373	395	418	440	464	500
0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
10	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
20	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,8	13,0	12,5	13,0	13,0
30	13,0	13,0	10,8	11,0	10,6	10,5	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,7	10,7	10,3	10,6	10,6	11,0	10,5	10,6	10,8	13,0	13,0
40	13,0	13,0	10,7	10,5	10,6	10,5	10,7	10,5	10,4	10,7	10,4	10,7	10,4	10,5	10,7	10,3	11,0	10,5	10,5	10,7	13,0	13,0
50	13,0	13,0	10,5	10,5	10,3	10,5	10,2	10,6	10,2	10,5	10,0	10,4	10,0	10,6	10,3	10,8	10,0	10,4	10,4	11,0	13,0	13,0
60	13,0	13,0	10,7	10,5	10,6	10,5	10,5	10,5	10,4	10,6	10,1	10,4	10,4	10,3	10,4	10,1	10,4	10,0	10,2	10,7	13,0	13,0
70	13,0	13,0	10,7	10,5	10,6	11,0	10,8	10,8	10,9	11,0	10,8	10,7	11,0	10,7	10,8	11,0	11,0	10,7	10,5	10,6	13,0	13,0
80	13,0	13,0	11,0	10,5	10,6	10,5	10,3	10,1	10,3	10,2	10,5	10,3	10,2	10,3	10,2	10,0	10,0	10,2	10,0	10,2	13,0	13,0
90	13,0	13,0	10,8	10,3	10,3	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6	10,8	10,5	10,3	10,8	10,7	10,6	10,5	10,5	10,8	13,0	13,0
100	13,0	13,0	10,5	10,6	10,7	10,5	10,6	10,3	10,3	10,6	10,3	10,6	10,2	10,1	10,3	10,3	10,5	10,0	10,0	10,5	13,0	13,0
110	13,0	13,0	10,5	10,3	10,3	10,5	10,8	10,8	10,7	10,8	10,5	10,4	10,6	10,0	10,3	10,4	10,9	10,1	10,3	11,0	13,0	13,0
120	13,0	13,0	10,5	10,3	10,1	10,5	10,7	10,7	10,8	10,7	10,9	10,5	10,5	10,3	10,8	10,7	10,5	10,8	10,4	10,7	13,0	13,0
130	13,0	13,0	10,5	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4	10,2	10,4	10,5	10,3	10,8	10,4	10,7	10,7	10,0	10,3	10,4	11,2	13,0	13,0
140	13,0	13,0	10,7	10,7	10,7	10,4	10,4	10,5	10,2	10,5	10,4	10,5	10,4	10,4	10,7	10,5	10,2	10,2	10,3	10,8	13,0	13,0
150	13,0	13,0	10,5	10,7	10,5	10,8	10,5	10,5	10,5	10,5	10,7	10,6	10,3	10,4	10,7	10,5	10,5	10,5	10,4	11,0	13,0	13,0
160	13,0	13,0	10,5	10,7	10,5	10,7	10,5	10,5	10,6	10,5	10,5	10,4	10,5	10,5	10,5	10,6	10,5	10,3	10,4	11,0	13,0	13,0
170	13,0	13,0	10,5	10,0	10,3	10,0	10,2	10,0	10,0	10,0	10,4	10,2	10,2	10,1	10,0	10,1	10,0	10,3	10,3	11,0	13,0	13,0

(Fonte: próprio autor).

5 – A partir dos valores de madeira virgem medidos, as espessuras de carvão foram calculadas subtraindo da seção transversal original os valores apresentados na Figura 4.14. Com base nesses dados, a Figura 4.15 foi elaborada. Schmid, Klippel *et al.* [74] recomendam um método semelhante para a medição manual da camada carbonizada. A grande diferença está no modo de demarcar a malha nas amostras e medir a espessura de madeira virgem. Os autores sugerem utilizar duas vigas-guia nas laterais da amostra para realizar a medição das espessuras

após a remoção de todo o carvão superficial, de tal modo que não seria necessário recortar o painel de CLT em pedaços menores.

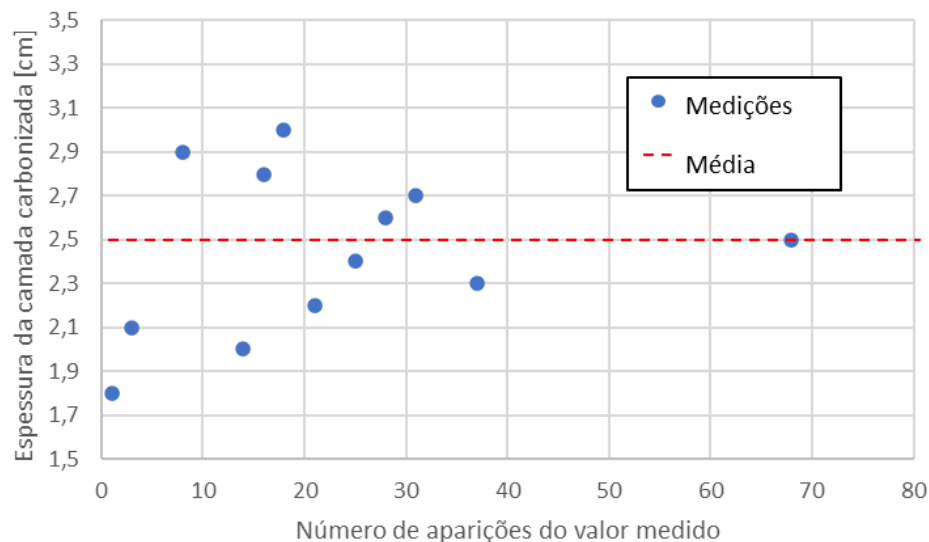
Figura 4.15 - Malha representando a espessura carbonizada do painel de CLT em *cm*.

Coordenadas [cm]	0	35	58	80	103	125	148	170	193	215	238	260	283	305	328	350	373	395	418	440	464	500	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,5	0,0	0,0
30	0,0	0,0	2,2	2,0	2,4	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,3	2,3	2,7	2,4	2,4	2,0	2,5	2,4	2,2	0,0	0,0	
40	0,0	0,0	2,3	2,5	2,4	2,5	2,3	2,5	2,6	2,3	2,6	2,3	2,6	2,5	2,3	2,7	2,0	2,5	2,5	2,3	0,0	0,0	
50	0,0	0,0	2,5	2,5	2,7	2,5	2,8	2,4	2,8	2,5	3,0	2,6	3,0	2,4	2,7	2,2	3,0	2,6	2,6	2,0	0,0	0,0	
60	0,0	0,0	2,3	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,4	2,9	2,6	2,6	2,7	2,6	2,9	2,6	3,0	2,8	2,3	0,0	0,0	
70	0,0	0,0	2,3	2,5	2,4	2,0	2,2	2,2	2,1	2,0	2,2	2,3	2,0	2,3	2,2	2,0	2,0	2,3	2,5	2,4	0,0	0,0	
80	0,0	0,0	2,0	2,5	2,4	2,5	2,7	2,9	2,7	2,8	2,5	2,7	2,8	2,7	2,8	3,0	3,0	2,8	3,0	2,8	0,0	0,0	
90	0,0	0,0	2,2	2,7	2,7	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,2	2,5	2,7	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,2	0,0	0,0	
100	0,0	0,0	2,5	2,4	2,3	2,5	2,4	2,7	2,7	2,4	2,7	2,4	2,8	2,9	2,7	2,7	2,5	3,0	3,0	2,5	0,0	0,0	
110	0,0	0,0	2,5	2,7	2,7	2,5	2,2	2,2	2,3	2,2	2,5	2,6	2,4	3,0	2,7	2,6	2,1	2,9	2,7	2,0	0,0	0,0	
120	0,0	0,0	2,5	2,7	2,9	2,5	2,3	2,3	2,2	2,3	2,1	2,5	2,5	2,7	2,3	2,5	2,5	2,2	2,6	2,3	0,0	0,0	
130	0,0	0,0	2,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2,6	2,5	2,7	2,2	2,6	2,3	2,3	3,0	2,7	2,6	1,8	0,0	0,0	
140	0,0	0,0	2,3	2,3	2,3	2,6	2,6	2,5	2,8	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	2,3	2,5	2,8	2,8	2,7	2,2	0,0	0,0	
150	0,0	0,0	2,5	2,3	2,5	2,2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,3	2,4	2,7	2,6	2,3	2,5	2,5	2,5	2,6	2,0	0,0	0,0	
160	0,0	0,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,7	2,6	2,0	0,0	0,0	
170	0,0	0,0	2,5	3,0	2,7	3,0	2,8	3,0	3,0	3,0	2,6	2,8	2,8	2,9	3,0	2,9	3,0	2,7	2,7	2,0	0,0	0,0	

(Fonte: próprio autor).

A espessura média de madeira carbonizada dos 270 pontos afetados pelo fogo (excluindo os pontos da área verde da Figura 4.15) apresentou um valor igual 2,50 cm, com desvio padrão amostral de 0,25 cm. A partir do levantamento da frequência de ocorrência dos valores de espessura carbonizada, é possível observar que existe uma convergência para o valor médio de 2,50 cm. Adicionalmente, o valor com a maior frequência de aparições (68 medições) também foi o 2,50 cm, conforme ilustrado pela Figura 4.16.

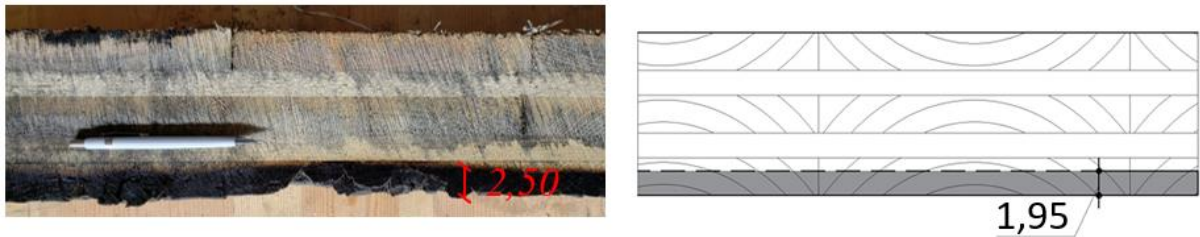
Figura 4.16 - Frequência de ocorrências das espessuras carbonizadas.



(Fonte: próprio autor).

Considerando uma taxa de carbonização $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ conforme indicado pelo fabricante do CLT [3], para 30 minutos de incêndio-padrão, a camada de carvão calculada seria de 1,95 cm. O comparativo entre o resultado do ensaio e o método de cálculo manual pode ser observado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Carbonização de ensaio versus carbonização calculada em *cm*.



(Fonte: próprio autor).

Por fim, foi possível observar que as regiões menos consumidas pelo fogo usualmente estão próximas dos nós naturais da madeira (Figura 4.18). Por outro lado, as emendas longitudinais entre lamelas (*finger-joints*) não interferiram na carbonização da madeira (Figura 4.19).

Figura 4.18 - Carbonização na região de nós.



Fonte: próprio autor.

Figura 4.19 - Carbonização nas emendas.

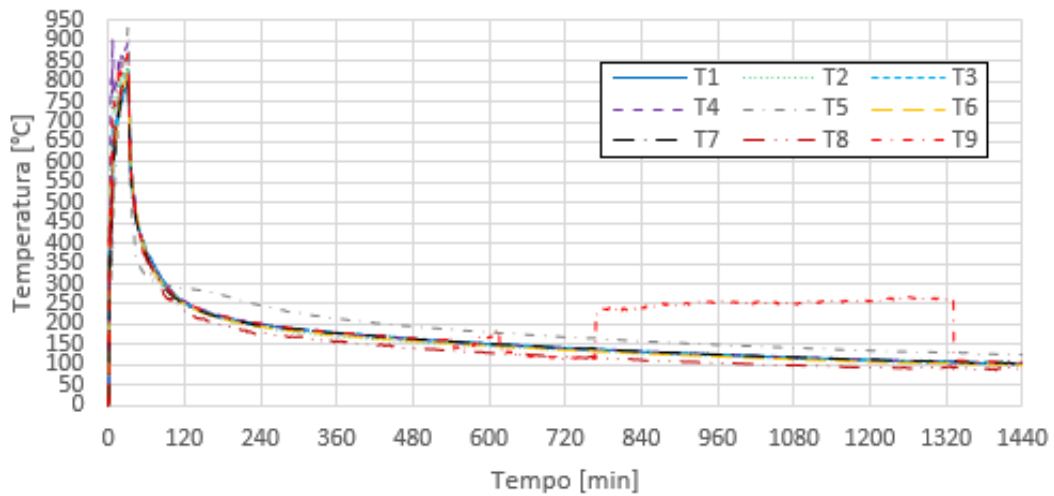


Fonte: próprio autor.

4.1.5 Desplacamento das lamelas

Durante a realização do ensaio, é possível identificar falhas na linha de cola a partir da medição da temperatura interna do forno. Em caso de delaminação, a carga de incêndio adicional provocada pela exposição da madeira virgem gera um aumento expressivo de temperatura. A Figura 4.20 representa a variação da temperatura dos termopares instalados no interior do forno ao longo das 24 horas.

Figura 4.20 – Temperatura interna do forno.

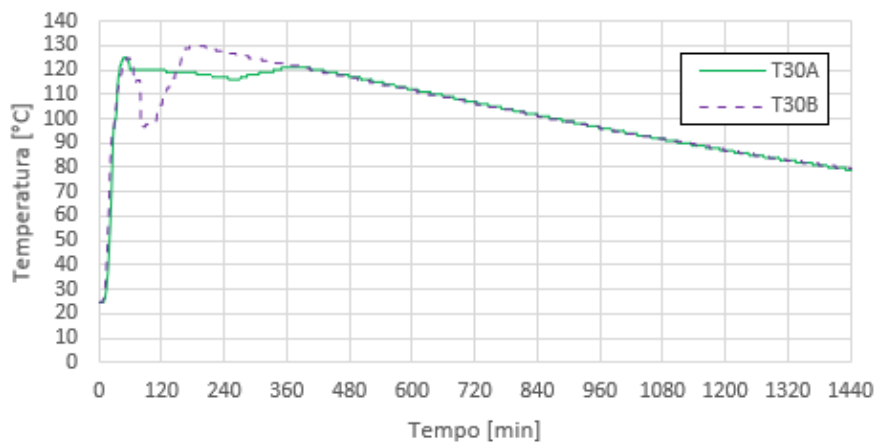


(Fonte: próprio autor).

Observa-se que houve uma variação brusca da temperatura medida no termopar T9 aos 760 minutos de ensaio (de 120 °C para 220 °C), que deve ser considerada como um erro de medição, uma vez que a temperatura dos demais termopares se manteve sem variações expressivas. Ou seja, considerando esse critério de análise, não ocorreram delaminações.

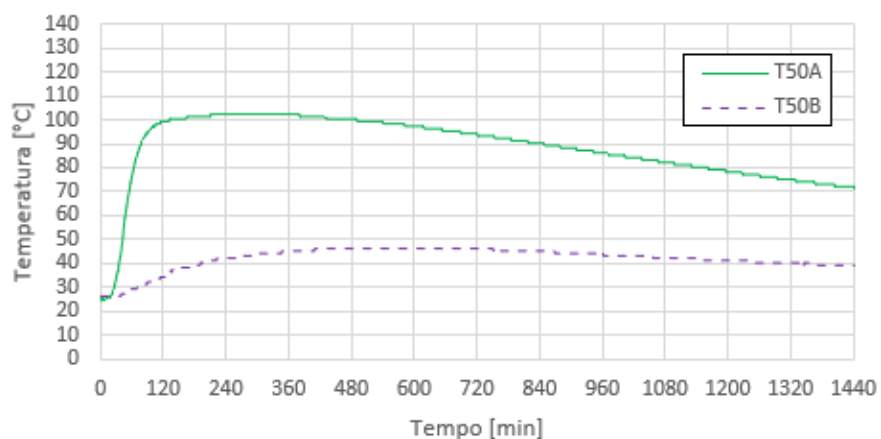
Outra maneira de verificar a ocorrência de delaminações é a partir da análise das temperaturas nas linhas de cola, que deve permanecer inferior aos 200 °C. O perfil de temperaturas ao longo do tempo medido por meio dos termopares das séries T30, T50, T80 e T100, posicionados na região dos adesivos, apresentou um comportamento conforme ilustrado pelas Figuras 4.21 à 4.24.

Figura 4.21 - Evolução da temperatura nos termopares da série T30.



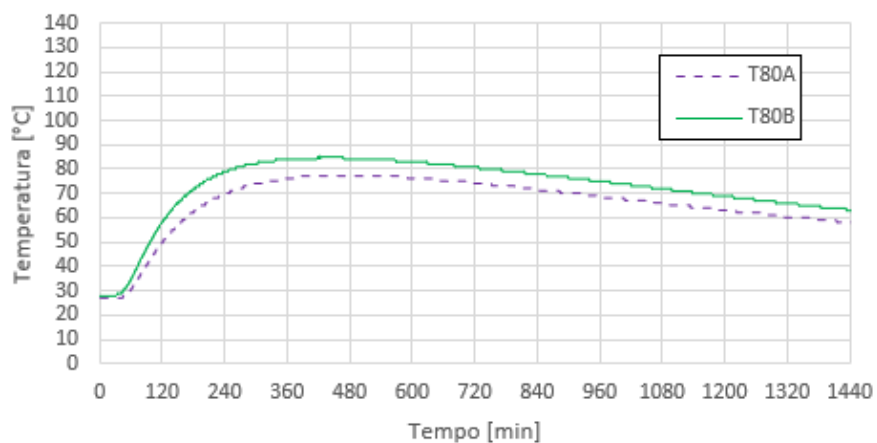
(Fonte: próprio autor).

Figura 4.22 - Evolução da temperatura nos termopares da série T50.



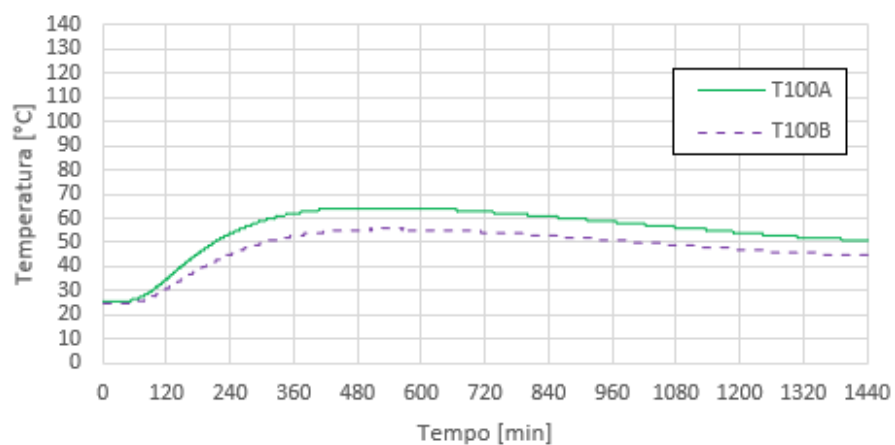
(Fonte: próprio autor).

Figura 4.23 - Evolução da temperatura nos termopares da série T80.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.24 - Evolução da temperatura nos termopares da série T100.



(Fonte: próprio autor).

Observa-se que nenhum termopar destas séries se aproximou da temperatura crítica de 200 °C. Após o ensaio, constatou-se que de fato não ocorreram delaminações da camada carbonizada. Adicionalmente, constatou-se que o fogo se extinguiu naturalmente após o desligamento dos queimadores, conforme já era esperado em função da ausência de ventilação do forno. As Figuras 4.25 a 4.31 ilustram os painéis de CLT após o ensaio.

Figura 4.25 - Laje de CLT posicionada sobre o forno.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.26 - Laje de CLT sendo removida do forno.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.27 - Vista inferior da laje de CLT após o ensaio.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.28 - Vista lateral de um painel de CLT após o ensaio.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.29 - Vista inferior de meia laje de CLT após o ensaio.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.30 - Paineis de CLT usinados após o teste.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.31 - Vista lateral do painel de CLT usinado após o teste.

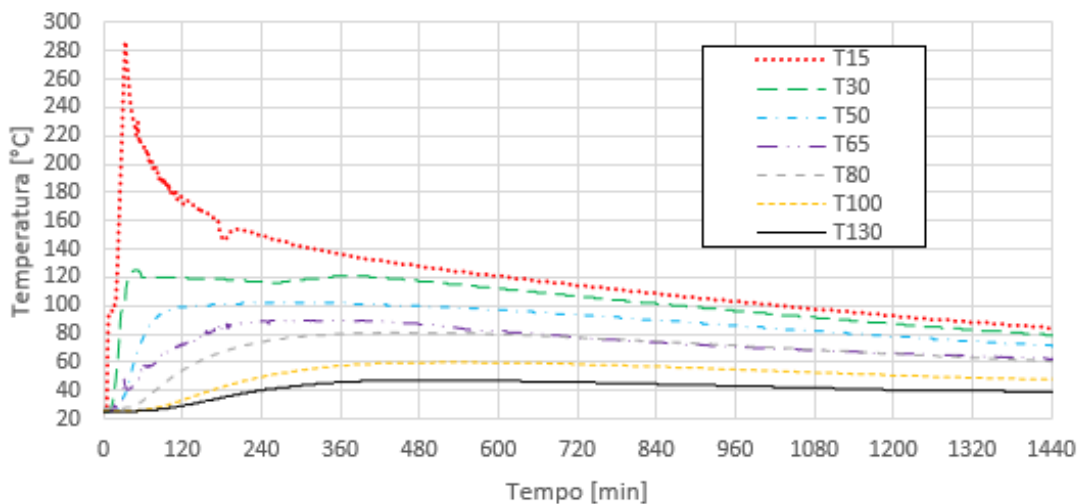


(Fonte: próprio autor).

4.1.6 Perfil de temperatura

Considerando que a madeira perde resistência e rigidez para temperaturas superiores a 60 °C, é importante analisar o perfil de temperatura através dos painéis durante o ensaio. A evolução da média das temperatura em todas as séries de termopares durante as 24 horas de ensaio pode ser observada na Figura 4.32. Para o cálculo das temperaturas médias, os termopares T15A ao T15E, T30B e T50B foram desprezados por apresentarem erros.

Figura 4.32 – Perfil de temperaturas nos termopares.



(Fonte: próprio autor).

Observa-se que, no instante do desligamento dos queimadores, apenas o termopar mais próximo à fonte de calor atingiu o pico de temperatura. Os demais termopares atingiram a temperatura máxima em instantes diferentes, conforme indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Temperaturas máximas nos termopares.

Série	Tempo [min]	Temperatura Máxima [°C]
T30	46	125
T50	210	102
T65	253	89,5
T80	418	81
T100	503	60
T130	553	47

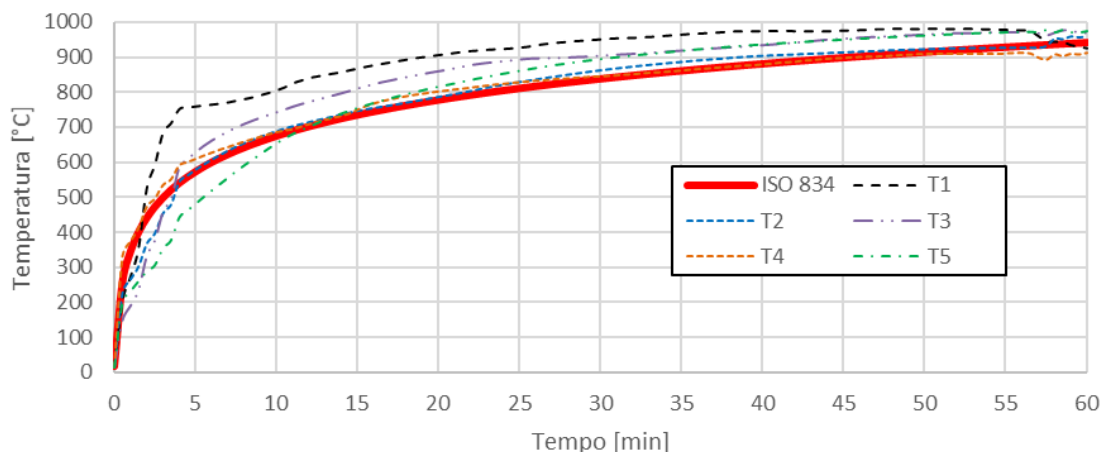
(Fonte: próprio autor).

As condições de ensaio fizeram com que o perfil de temperatura atravessasse toda a placa de madeira engenheirada durante um período relativamente longo. Nota-se que o painel de CLT iniciou a dissipação de calor após mais de 9 horas de ensaio em função da ausência de ventilação do forno, no instante em que a série de termopares T130 atinge a temperatura de 47 °C. Adicionalmente, pontua-se que a lamela central atingiu valores de temperatura variando entre 81 °C e 102 °C, conforme medições realizadas pela linha de termopares T50, T65 e T80.

4.2 Resultados do ensaio de painéis de paredes de CLT

Para a verificação da aplicação adequada da curva de incêndio-padrão durante o ensaio, foi construído um gráfico contendo um comparativo entre os dados de temperatura medidos pelos termopares da série T1 a T5, instalados no interior do forno, e as temperaturas determinadas pela curva ISO 834 (Figura 4.33).

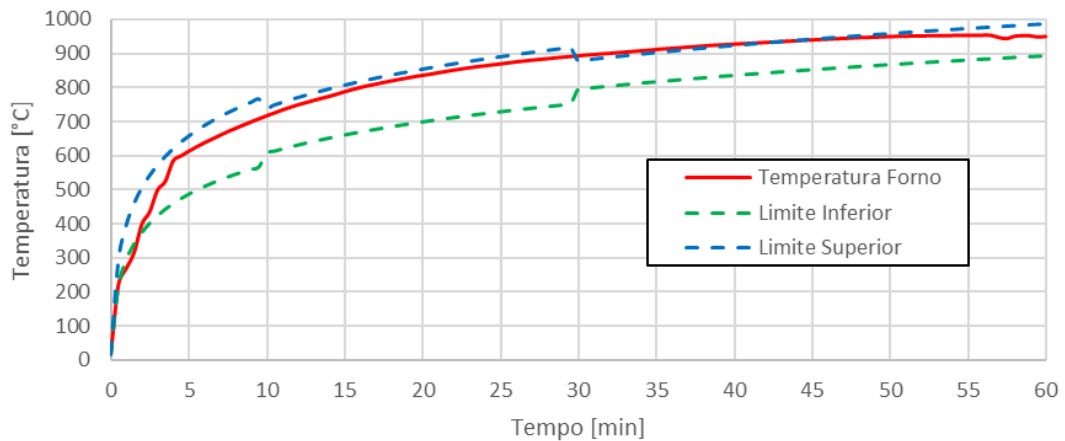
Figura 4.33 - Comparativo entre ISO 834 e temperaturas internas do forno.



(Fonte: próprio autor).

Considerando o valor médio das temperaturas medidas pelos termopares T1 a T5 plotado em conjunto com a tolerância de temperaturas máximas e mínimas apresentadas pela norma brasileira ($\pm 15\%$ durante os primeiros 10 minutos, $\pm 10\%$ entre 10 e 30 minutos e $\pm 5\%$ após 30 minutos de teste), é possível observar que o programa térmico aplicado durante o teste aderiu aos limites da curva ISO-834, conforme demonstrado pela Figura 4.34.

Figura 4.34 - Comparativo entre temperatura média do forno e tolerância de norma.



(Fonte: próprio autor).

4.2.1 Estanqueidade

Durante o ensaio, a estanqueidade foi verificada 5 vezes. Em nenhuma medição ocorreu a ignição do chumaço de algodão posicionado próximo à união entre os painéis.

Figura 4.35 - Passagem de fumaça entre o painel e o forno vertical.



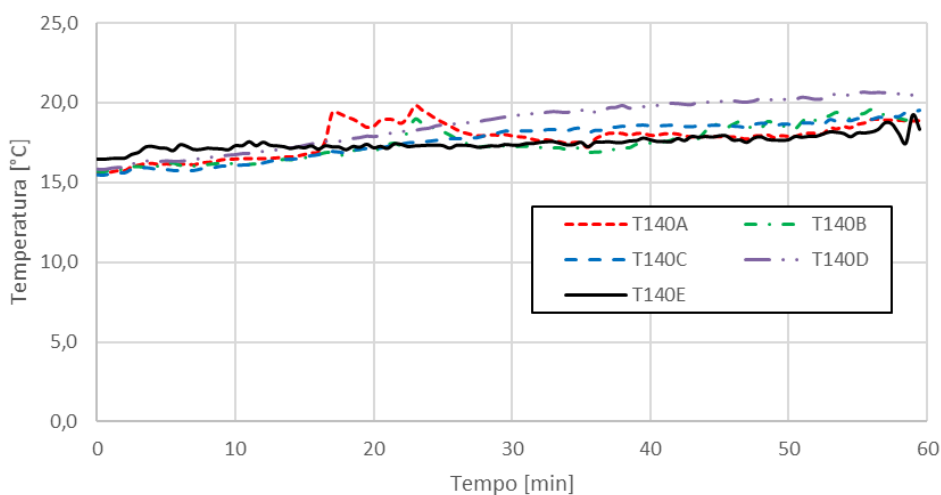
(Fonte: próprio autor).

Observa-se que a passagem de fumaça ocorreu somente na união entre a parede de CLT e a estrutura do forno (Figura 4.35), que não foi selada com o silicone por não fazer parte do sistema construtivo.

4.2.2 Isolamento térmico

No decorrer dos 60 minutos de ensaio, observou-se uma elevação da temperatura da superfície do CLT não exposta ao fogo em aproximadamente 3,8 °C. Inicialmente, os termopares da série T140 mediam a temperatura média de 15,8 °C, que passou a 19,6 °C após o desligamento dos queimadores a gás. Na Figura 4.36, é possível observar a variação de temperatura dos 5 termopares durante o ensaio.

Figura 4.36 - Medição de temperatura dos termopares da série T140.



(Fonte: próprio autor).

4.2.3 Deslocamentos

Durante o ensaio, foram observadas pequenas variações com relação à posição dos painéis de CLT. Aos 5 minutos de teste, mediu-se o deslocamento máximo no centro das placas, na ordem de 7 mm no sentido do forno.

4.2.4 Resultados adicionais

Na fase de resfriamento natural do ensaio, após os 60 minutos do programa térmico ativo, ocorreu uma redução significativa da seção transversal das amostras em dois pontos localizados na parte inferior da parede de CLT (Figura 4.37). Esse fato inviabilizou a continuidade do ensaio de resistência ao fogo, impedindo a reaplicação do carregamento vertical sobre a parede 24 horas após o desligamento dos queimadores. Por medidas de segurança, o Corpo de Bombeiros do Rio Grande do Sul foi acionado para combater as chamas remanescentes e extinguir o fogo por completo (Figura 4.38).

Figura 4.37 - Aberturas na parede de CLT durante o ensaio de resistência ao fogo.



(Fonte: próprio autor).

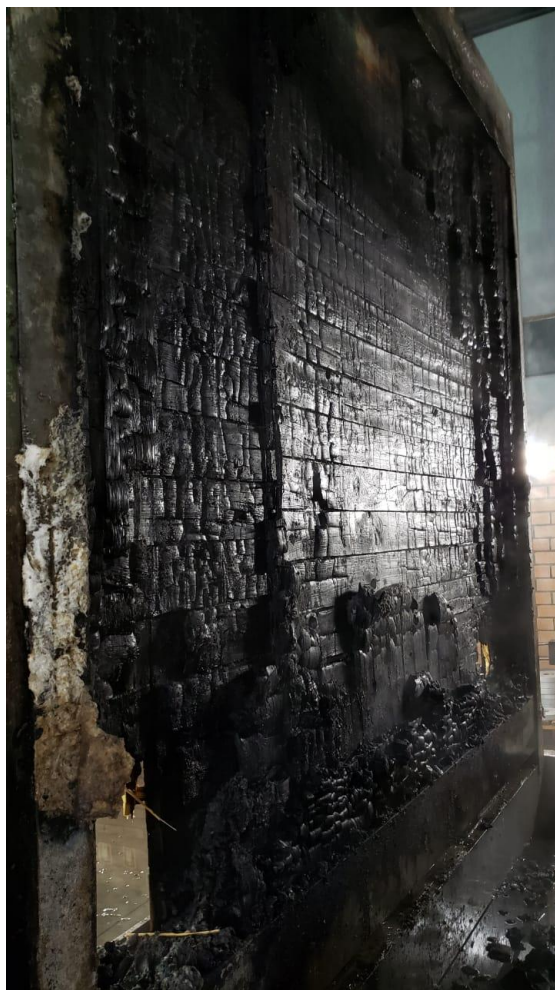
Figura 4.38 - Extinção do fogo dos painéis de CLT.



(Fonte: próprio autor).

Após a realização do ensaio, foi possível notar que ocorreram deslocamentos sucessivos das lamelas do CLT, especialmente na região inferior da parede, o que inviabilizou a auto extinção natural do fogo. Adicionalmente, em função da queima heterogênea da seção transversal das placas, não foi possível determinar a espessura carbonizada dos painéis engenheirados. Nas Figuras 4.39 e 4.40, é possível observar os painéis de CLT após a realização do teste de resistência ao fogo.

Figura 4.39 - Vista da parede após o teste.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.40 - CLT após o deslocamento.



(Fonte: próprio autor).

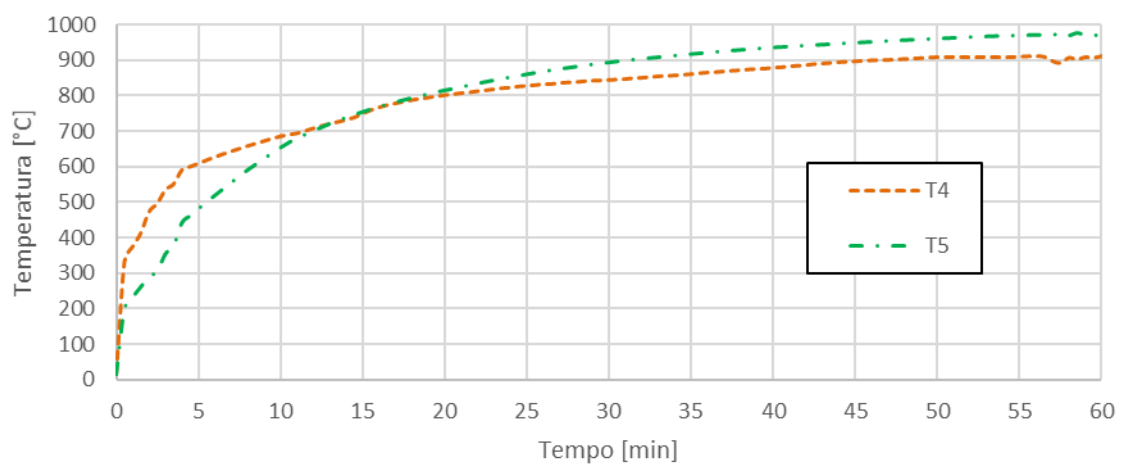
Destaca-se que a delaminação mais acentuada observada na parte inferior da parede de CLT possivelmente foi ocasionada pelo aumento da temperatura na região próxima ao piso do forno. No decorrer do ensaio, a madeira carbonizada se despreendeu da parede e acumulou na base do forno (Figura 4.41), gerando uma diferença de temperatura de aproximadamente 70 °C entre a leitura dos termopares T4 e T5, conforme pode ser observado na Figura 4.42.

Figura 4.41 - Carvão acumulado na base do forno.



(Fonte: próprio autor).

Figura 4.42 - Comparativo entre as temperaturas na parte inferior e superior do forno.



(Fonte: próprio autor).

5 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

5.1 Conclusões sobre o ensaio de lajes de CLT

Após a realização do ensaio de resistência estrutural de uma laje de CLT submetida a 30 minutos do programa térmico padrão, conforme prescrições da norma NBR 5628, é possível concluir que:

- a) Com relação à estanqueidade: as placas de CLT não apresentaram fissuras ao longo do perfil transversal, impedindo, portanto, a passagem de chamas e gases quentes entre ambientes. Este aspecto é de extrema importância para a segurança das estruturas em situação de incêndio, uma vez que a compartimentação entre andares de um edifício é uma das principais medidas de proteção passiva. Destaca-se, entretanto, que há a possibilidade de ocorrer a passagem de gases quentes na região de união lateral entre os painéis de CLT. Conclui-se, portanto, que é fundamental o tratamento adequado das juntas com selantes *firestop* ou a inclusão de um contrapiso sobre a laje para garantir a estanqueidade do sistema;
- b) Com relação ao isolamento térmico: durante o ensaio de 24 horas, que incluiu a fase de resfriamento natural da amostra, observou-se que a temperatura da face superior do CLT não superou os 50 °C. Portanto, os painéis de CLT cumpriram sua função, não permitindo a elevação da temperatura ao valor de 140 °C na média e de 180 °C no pico. Conclui-se que o isolamento térmico do sistema foi garantido;
- c) Com relação aos deslocamentos: na primeira fase do teste, observou-se um deslocamento máximo de 1,09 cm. Durante a reaplicação do carregamento, realizada 24 horas após a finalização da primeira fase do ensaio, observou-se um acréscimo nos deslocamentos da laje de CLT, com o valor máximo chegando a 1,67 cm. Esse valor representa o vão sobre 239, inferior ao limite pré-estipulado de 13,33 cm (vão sobre 30). Conclui-se que, neste quesito, a laje ensaiada obteve um desempenho adequado. Entretanto, é importante destacar que o acréscimo de deslocamentos medidos entre as duas fases do ensaio está relacionado à queima lenta da madeira durante as 24 horas do teste e à diminuição de rigidez do painel, cuja seção transversal não carbonizada foi afetada por temperaturas acima dos 60 °C no decorrer da segunda fase do ensaio;
- d) Com relação à camada carbonizada: a camada de carvão apresentou espessura superior à calculada manualmente por meio do método da seção reduzida. Considerando que o painel de CLT permaneceu por mais 24 horas sobre o efeito de elevadas temperaturas (mesmo após o desligamento dos queimadores), a carbonização adicional ocasionada

pela queima não flamejante da madeira já era esperada. No caso específico deste ensaio, tem-se um delta na ordem de 5,5 mm ($\Delta 24h = 25 - 19,5 = 5,5$ mm). É importante destacar que é extremamente necessária a realização de ensaios complementares para aferição do delta aqui mencionado.

- e) Com relação ao deslocamento das lamelas: observou-se que as temperaturas nos termopares posicionados sobre as linhas de cola permaneceram abaixo do valor crítico de 200 °C. Consequentemente, não ocorreu a delaminação da placa de CLT durante o ensaio, fato que, somado à ausência de ventilação do forno, possibilitou a extinção natural do incêndio. Apesar disso, pontua-se que as temperaturas de pico nas regiões dos adesivos foram atingidas muitas horas após o desligamento dos queimadores. Isto indica que, seguindo os critérios preestabelecidos pela NBR 5628, existe a possibilidade de outras configurações de CLT delaminarem durante o período de resfriamento natural da amostra. Como consequência, a auto extinção das placas de madeira ensaiadas poderia não ocorrer, afetando a segurança da estrutura em situação de incêndio. Por fim, observa-se que a linha de cola mais próxima ao fogo, na altura dos termopares da série T30, permaneceu íntegra apesar de ter apresentado temperaturas elevadas (entre 80 e 130 °C) durante um período longo de 24 horas;
- f) Com relação ao fluxo de temperatura: conforme observado durante o ensaio, a amostra de CLT não colapsou ou apresentou sinais de que iria entrar em ruína durante as 24 horas de teste. Entretanto, o perfil de temperaturas ao longo da seção transversal da placa indicou valores de temperatura próximos aos 100 °C para a lamela central. Conforme apresentado pelo *Eurocode 5*, existe uma queda brusca na resistência e na rigidez da madeira para temperaturas nessa ordem de grandeza. Portanto, para outras configurações de testes, que inclui variação das espessuras das lamelas do CLT, a duração e o grau de ventilação do ensaio (no caso de ensaios naturais compartimentados), existe a possibilidade de ocorrerem deslocamentos elevados ou até a ruína da amostra na fase de resfriamento natural do teste.

5.2 Conclusões sobre o ensaio de paredes de CLT

Após o ensaio de resistência ao fogo de uma parede de CLT, submetida a 60 minutos da curva ISO 834, é possível concluir que:

- a) Com relação à estanqueidade: a parede de CLT manteve-se estanque durante todo o ensaio de resistência ao fogo. A passagem de gases quentes e de fumaça entre ambientes ocorreu apenas na união entre a parede e a estrutura do forno, uma vez que esta região

não estava selada com o silicone. Assim como no ensaio de lajes de CLT, conclui-se que o tratamento das juntas com selantes *firestop* é extremamente importante para garantir a estanqueidade do sistema;

- b) Com relação ao isolamento térmico: da mesma forma que ocorreu no ensaio de lajes de CLT, a parede obteve um excelente desempenho nesse critério de avaliação. Após os 60 minutos de ensaio, a elevação de temperatura na face não exposta ao fogo foi inferior a 4 °C, o que permite afirmar que os requisitos de isolamento térmico do sistema construtivo foram garantidos;
- c) Com relação aos deslocamentos: o máximo deslocamento horizontal ocorreu aos 5 minutos de ensaio. Foi medido um deslocamento de 7 mm no centro da parede, no sentido do forno. Apesar da norma brasileira não prever um limite máximo para os deslocamentos transversais de paredes, é possível afirmar que o elemento estrutural ensaiado obteve um desempenho satisfatório nesse quesito;
- d) Observações adicionais: a redução acentuada da seção transversal na parte inferior da parede, ocasionada pela delaminação das lamelas do CLT, inviabilizou a reaplicação do carregamento 24 horas após o desligamento dos queimadores. Nessa situação, a atual versão da NBR 5628 aponta que o tempo de resistência ao fogo da amostra deve ser igual a 80% do tempo de aquecimento do forno, portanto, pelos critérios da norma brasileira, a parede resistiu a 48 minutos da curva de incêndio-padrão.

No entanto, observa-se que o critério de redução do tempo de resistência ao fogo em 80% está sendo discutido nas reuniões do comitê de revisão da norma nacional, uma vez que a avaliação após 24 horas não possui embasamento teórico em ensaios que utilizam a curva de incêndio-padrão ISO 834, conforme mencionado na metodologia deste trabalho. Caso a análise do ensaio tivesse como base as normas internacionais [37; 71], o tempo de resistência ao fogo seria de 60 minutos.

Por fim, observa-se que a queima heterogênea dos painéis de CLT, ocasionada pelos sucessivos deslocamentos das lamelas, inviabilizou a determinação de uma única espessura de carbonização da madeira além de ter impedido a auto extinção do fogo durante o ensaio.

5.3 Observações finais e recomendações

Como observações finais do trabalho, é importante destacar que a utilização de adesivos não resistentes ao fogo para colagem das lamelas dos painéis de CLT reduz a segurança das estruturas de madeira em situação de incêndio, especialmente considerando a possibilidade de

ocorrerem deslocamentos das lamelas de madeira, conforme pôde ser observado no ensaio de paredes. A delaminação do CLT inviabiliza a auto extinção natural do fogo e pode resultar no consumo total da peça de madeira caso o incêndio não seja combatido.

Algumas regulamentações internacionais, como é o caso da norma americana PRG 320 [20], proíbem a comercialização de painéis com esse tipo de adesivo. Entretanto, os países europeus estão endereçando o problema de maneira diferente. No projeto de revisão do *Eurocode 5* [44], foi acrescentado um método de ensaio em escala reduzida (amostras de aproximadamente 1,0 x 1,0 m) para a determinação da manutenção da integridade do adesivo estrutural em situação de incêndio. Caso o adesivo perca a integridade, deve-se considerar o efeito da delaminação no cálculo da seção transversal reduzida.

O autor recomenda que o adesivo estrutural não resistente ao fogo seja utilizado apenas em construções em que o TRRF seja de até 60 minutos, contanto que a lamela de madeira exposta ao fogo possua ao menos 40 mm de espessura. Dessa maneira, os deslocamentos das lamelas de CLT serão limitados. Por fim, recomenda-se que o método de ensaio proposto pelo projeto de revisão da norma europeia seja absorvido pela norma brasileira de estruturas de madeira, afim de se caracterizar os adesivos estruturais utilizados no mercado nacional.

Adicionalmente, observa-se que a análise das estruturas de CLT pós-incêndio deve levar em consideração a perda de resistência e de rigidez da madeira que foi afetada pela elevação de temperatura no decorrer do incêndio, mesmo que a seção transversal não tenha sido carbonizada pelo fogo. Atualmente, esse aspecto é considerado a partir da utilização da camada de resistência nula presente no método da seção transversal reduzida. Entretanto, é importante destacar que o cálculo da camada de resistência nula não leva em consideração a fase de resfriamento natural dos incêndios.

Inúmeras pesquisas têm sido elaboradas objetivando a análise das estruturas de madeira na fase de resfriamento do incêndio, especialmente com estudos voltados para a determinação da profundidade com que o calor afeta a madeira após a linha de carvão e para a carbonização lenta da madeira [38; 75]. No ensaio de resistência ao fogo da laje de CLT discutido no presente trabalho, observou-se que todas as lamelas do CLT foram afetadas pelo acréscimo de temperatura na fase de resfriamento natural bem como ocorreu a carbonização lenta da madeira durante o teste. Pontua-se, entretanto, que o ensaio descrito possui limitações, especialmente relacionadas à ausência de ventilação no forno, o que resultou em uma longa curva de resfriamento natural da amostra. O autor sugere que sejam realizados ensaios de incêndio

naturais compartimentados para que esses dois aspectos possam ser aferidos para os mais diferentes tipos de configuração de teste, variando especialmente a quantidade de madeira exposta ao fogo e o grau de ventilação do ensaio.

Finalmente, durante a execução dos ensaios, observou-se que o retardante de chamas aplicado superficialmente no CLT não alterou os resultados relativos à carbonização e ao tempo de resistência ao fogo do painel, conforme já era esperado. Em outras pesquisas [68], observou-se uma diminuição do valor da taxa de carbonização da madeira e conseqüentemente um aumento do tempo de resistência ao fogo da peça em função do método de aplicação do produto retardante de chamas, que foi impregnado na madeira por imersão.

Recomenda-se que sejam realizados ensaios de reação ao fogo de painéis de CLT das mais variadas composições de acabamentos superficiais, considerando diferentes tipos de retardantes de chamas, de pinturas intumescentes e de *stains*. Seria importante incluir na análise a efetividade dos produtos após a ação de intempéries, comuns no período de montagem das estruturas e de uso das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **Details for conventional wood frame construction**. American Forest & Paper Association. Washington, DC, p.53. 2001.
- [2] SWEDISH WOOD. **The CLT Handbook: CLT Structures - facts and planning**. 1ª Edição. Estocolmo, Suécia: Swedish Forest Industries Federation, 2019.
- [3] EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT (EOTA). **ETA-06/0138: Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings**. Viena, Áustria: 51 p. 2017.
- [4] CARVALHO, L. F.; CARVALHO JORGE, L. F.; JERÓNIMO, R. Plug-and-Play Multistory Mass Timber Buildings: Achievements and Potentials. **Journal of Architectural Engineering**, v. 26, n. 2, 2020.
- [5] KREMER, P. D.; SYMMONS, M. A. Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: a PESTEL evaluation of the potential. **International Wood Products Journal**, v. 6, n. 3, p. 138-147, 2015.
- [6] FAST, P. et al. **Case Study: an 18 storey tall mass timber hybrid student residence at the University of British Columbia, Vancouver**. World Conference on Timber Engineering (WCTE) Viena, Áustria: 9 p. 2016.
- [7] FERNANDEZ, A.; PERANTO, J.; KOMP, J. Ascent - Challenges and Advances for Tall Mass Timber Construction. **International Journal of High-Rise Buildings**, v. 9, n. 3, 2020.
- [8] SALVADORI, V. **Multi-Storey Timber-Based Buildings: An International Survey of Case-Studies with Five or More Storeys Over the Last Twenty Years**. 2021. 527 p. (Dissertação de Mestrado) Faculdade de Arquitetura e Ordenamento do Território, Universidade Técnica de Viena (TUW), Viena, Áustria.
- [9] PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.
- [10] JUNIOR, C. C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. 1ª Edição. Barueri, Brasil: Editora Manole Ltda, 2003.
- [11] PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5**. 1ª Edição. Oxford, Inglaterra: Blackwell Publishing Ltd, 2007. ISBN 978-14051-4638-8.
- [12] SWEDISH WOOD. **Design of Timber Structures: Structural Aspects of Timber Construction**. 2ª Edição. Estocolmo, Suécia: Swedish Forest Industries Federation, 2016. 315 p. ISBN 978-91-980304-8-8.

- [13]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **PN 02:126.10 ABNT NBR 7190:2021: Projetos de Estrutura de madeira**. Rio de Janeiro, Brasil: 119 p. 2021.
- [14]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 338 – Structural Timber Strength classes**. Bruxelas, Bélgica: 11 p. 2016.
- [15]OKIMOTO, F. S. **Pontes protendidas de madeira: parâmetros de projeto**. 1997. 175 p. (Dissertação de Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- [16]STRUCTURE CRAFT. Mass Timber Products. <https://structurecraft.com/>, Acesso em: 21/06/2021.
- [17]AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **Mass timber buildings and the IBC**. Edição de 2021. Estados Unidos da América: INTERNATIONAL CODE COUNCIL (ICC), 2020. ISBN 978-1-952468-02-5.
- [18]EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT (EOTA). **European Assessment Documente EAD 130005-00-0304: Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings**. Bruxelas, Bélgica: 14 p. 2015.
- [19]MOHAMMAD, M. et al. Introduction to Cross Laminated Timber. **Wood Design Focus**, v. 22, n. 2, p. 12, 2010.
- [20]THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (APA). **ANSI/APA PRG 320 Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Nova Iorque, Estados Unidos da América: 58 p. 2019.
- [21]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN16351: Timber structures - Cross laminated timber Requirements**. Bruxelas, Bélgica: 100 p. 2021.
- [22]INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16696-1 Timber Structures - Cross laminated timber - Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme**. Genebra, Suíça: 25 p. 2019.
- [23]CANADIAN STANDARD ASSOCIATION (CSA). **CSA O86 - Engineering Design in Wood**. Toronto, Canadá: 345 p. 2019.
- [24]AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **National Design Specification (NDS) for Wood Construction**. Leesburg, Estados Unidos da América: 194 p. 2018.
- [25]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Bruxelas, Bélgica: 121 p. 2004.

- [26]PROHOLZ AUSTRIA. **Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and and principles according to Eurocode**. Viena, Austria: ProHolz Austria, 2014. 190 p. ISBN 978-3-902926-03-6.
- [27]ICC AD HOC COMMITTEE ON TALL WOOD BUILDINGS. **Tall Mass Timber Proposals Code Action Hearing (Group A)**. ICC Ad Hoc Committee on Tall Wood Buildings. Estados Unidos da América, p.75. 2018.
- [28]NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADÁ. British Columbia Building Code. <https://www.bccodes.ca/building-code.html>, Acesso em: 21/06/2021.
- [29]NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADÁ. Ontario Building Code. <http://www.buildingcode.online/>, Acesso em: 20/06/2021.
- [30]FALK, A.; DIETSCH, P.; SCHMID, J. **Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 “Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings”**. Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404. Estocolmo, Suécia, 2016. 195 p.
- [31]CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica nº 8 - Segurança Estrutural Contra Incêndio**. São Paulo, Brasil: 11 p. 2019.
- [32]CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica nº 10 - Controle de Materiais de Acabamento e Revestimento**. São Paulo, Brasil: 8 p. 2019.
- [33]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR5628 Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, Brasil: 6 p. 2001.
- [34]FP INNOVATIONS. **Canadian CLT Handbook**. Point-Claire, Canadá: FP Innovations, 2019. ISBN 978-0-86488-592-0.
- [35]DRYSDALE, D. **An Introduction to Fire Dynamics**. 3ª Edição. Edimburgo, Escócia: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [36]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1995 1-2 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design**. Bruxelas, Bélgica: 69 p. 2004.
- [37]INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834-1: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements**. Genebra, Suíça: 25 p. 1999.
- [38]WIESNER, F. et al. Structural capacity in fire of laminated timber elements in compartments with exposed timber surfaces. **Engineering Structures**, v. 179, p. 284-295, 2019. ISSN 01410296.

- [39]SILVA, M. R. D. **O efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda***. 2012. 223 p. (Tese de Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- [40]SCHMID, J. et al. **Comparison of the Fire Resistance of Timber Members in Tests and Calculation Models**. International Council for Research and Innovation in Buildings and Construction Working Commission - Timber Structures. Vancouver, Canadá: 12 p. 2013.
- [41]SCHMID, J. et al. The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and Determination of the Zero-Strength Layer. **Fire Technology**, v. 51, n. 6, p. 1285-1309, 2014.
- [42]SCHMID, J. et al. Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. **Fire Safety Journal**, v. 68, p. 81-99, 2014. ISSN 03797112.
- [43]SCHAFFER, E. L. **Structural Fire Design: Wood**. US Department of Agriculture. Madison, Estados Unidos da América, p.21. 1984.
- [44]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **prEN 1995-1-2 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General – Structural fire design**. Bruxelas: 138 p. 2020.
- [45]FRANGI, A. et al. Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. **Fire Safety Science**, v. 9, p. 1279-1290, 2008. ISSN 18174299.
- [46]KLIPPEL, M.; SCHMID, J. Design of Cross-Laminated Timber in Fire. **Structural Engineering International**, v. 27, n. 2, p. 224-230, 2018.
- [47]JOHANSSON, E.; SVENNINGSSON, A. **Delamination of Cross-laminated timber and its impact on fire development focusing on different types of adhesives**. Lund University. Lund, Suécia, p.170. 2018.
- [48]SU, J. et al. **Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests**. Research Foundation for the NFPA Mission. Ottawa, Canadá, p.397. 2018.
- [49]FRANGI, A. et al. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 8, p. 1078-1087, 2009. ISSN 0379-7112.
- [50]SCHMID, J. et al. **The use of furnace tests to describe real fires fo timber structures**. World Conference on Timber Engineering (WCTE). Seul, Coréia do Sul: 8 p. 2018.
- [51]KLIPPEL, M., JUST, A. **Guidance on Fire design of CLT including best practise, COST Action FP1404**. Zúrique, Suíça: COST Action FP1404, 2018.

- [52]STORA ENSO. **CLT - Cross Laminated Timber - Fire Protection**. Suécia, p.51. 2016.
- [53]SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. 2ª Edição. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher Ltda, 2016.
- [54]THOMAS, G. C.; BUCHANAN, A. H.; FLEISCHMANN, C. M. **Structural Fire Design: The Role of Time Equivalence**. FIRE SAFETY SCIENCE - PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM. Melbourne, Austrália: FIRE SAFETY SCIENCE: 607-618 p. 1997.
- [55]BRANDON, D. **Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 4 – Engineering Methods**. Research Foundation for the NFPA Mission. Boras, Suécia, p.46. 2018.
- [56]CRIELAARD, R. et al. **Self-Extinguishment of cross-laminated timber**. World Conference on Timber Engineering (WCTE). Viena, Áustria: 11 p. 2016.
- [57]EMBERLEY, R. L. **Fundamentals for the Fire Design of Cross Laminated Timber Buildings**. 2017. (Tese de Doutorado) School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Austrália.
- [58]CUEVAS, J.; TORERO, J. L.; MALUK, C. Flame extinction and burning behaviour of timber under varied oxygen concentrations. **Fire Safety Journal**, v. 120, 2020. ISSN 03797112.
- [59]MCGREGOR, C. J. **Contribution of cross-laminated timber panels to room fires**. 2013. 166 p. (Tese de Mestrado) Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Carleton, Canadá.
- [60]KLIPPEL, M. et al. **Fire Tests on Loaded Cross-laminated Timber Wall and Floor Elements**. The Eleventh International Symposium on Fire Safety Science. Canterbury, Nova Zelândia: The International Association for Fire Safety Science (IAFSS). 11: 626-639 p. 2014.
- [61]PALMA, P. **Fire behaviour of timber connections**. 2016. 111 p. (Tese de Doutorado) Chair of Structural Engineering – Timber Structures, ETH Zurich, Zurich, Suíça.
- [62]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 13501-1 Fire classification of construction products and building elements**. Bruxelas, Bélgica: 122 p. 2018.
- [63]ANNA-LISA ÖSTMAN, B. et al. Fire Design of Clt in Europe. **Wood and Fiber Science**, v. 50, p. 68-82, 2018.
- [64]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 13823 Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item**. Bruxelas, Bélgica: 108 p. 2020.

- [65]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN ISO 11925-2 Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Single-flame source test.** Bruxelas, Bélgica: 36 p. 2020.
- [66]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN ISO 9239-1 Reaction to fire tests for floorings. Determination of the burning behaviour using a radiant heat source.** Bruxelas, Bélgica: 36 p. 2010.
- [67]EUROPEAN COMISSION. 2005/610/EC: Commission Decision of 9 August 2005 establishing the classes of reaction-to-fire performance for certain construction products. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32005D0610>, Acesso em: 21/06/2021.
- [68]MARTINS, G. C. A. **Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio.** 2016. 199 p. (Tese de Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- [69]CANADIAN WOOD COUNCIL (CWC). Fire-retardant-treated wood. <https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/wood-products/fire-retardant-treated-wood/>) Acesso em: 21/06/2021.
- [70]MCNAUGHTON, G. C. **Fire-Retardant Treatments for Wood.** US Department of Agriculture. Madison, Estados Unidos da América, p.12. 1943
- [71]EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1365-2: Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 2: Floors and roofs.** Bruxelas, Bélgica: 28 p. 2016.
- [72]CKC DO BRASIL. Selante Corta Fogo a Base de Silicone. <https://www.ckc.com.br/index.php/produtos-principal/153-ckc-inss-2460.html>, Acesso em: 09/08/2021.
- [73]ROTHOBLAAS. Produtos de Fixação. <https://www.rothoblaas.pt/produtos/fixacao/parafusos/parafusos-carpintaria/hbs>, Acesso em: 09/08/2021.
- [74]SCHMID, J. et al. **Charring of timber - determination of the residual virgin cross section and charring rates.** World Conference on Timber Engineering. Santiago, Chile: 9 p. 2021.
- [75]ARUP. Large compartment fire experiments: expanding knowledge of building safely with timber. <https://www.arup.com/perspectives/large-compartment-fire-experiments-expanding-knowledge-of-building-safely-with-timber>, Acesso em: 31/01/2022.

APÊNDICE A – Calculadora de verificação de lajes de CLT

A seguir, será apresentada a primeira versão da calculadora de verificação e dimensionamento de lajes de CLT, desenvolvida pelo autor deste trabalho em conjunto com os engenheiros Johnny Fontana, desenvolvedor de softwares de cálculo estrutural da empresa brasileira TQS e da engenheira Ana Carolina Pegoraro Cardozo, especialista em cálculo de estruturas de madeira da empresa Amata Urbem. A elaboração da Calcula Timber CLT faz parte das ações implementadas pela empresa Amata Urbem visando a divulgação da tecnologia da madeira engenheirada no mercado brasileiro.

A calculadora dimensiona lajes de CLT de acordo com as recomendações apresentadas pelo documento técnico europeu ProHolz Austria: Cross-laminated timber structural design – Basic design and engineering principles according to Eurocode [26], que foi utilizado como texto base para a inclusão do dimensionamento de painéis de CLT no projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190 [13]. Seguindo as orientações do documento austríaco, a Calcula Timber CLT utiliza a teoria de barras de Bernoulli-Euler associada ao Método Gama como método para a realização de seus cálculos.

A Figura A.1 ilustra o layout inicial da calculadora. Como dados de entrada, o usuário deve informar o vão da laje, a classe de resistência da madeira, a seção transversal do painel, as condições de contorno da placa, o carregamento e o TRRF para qual o painel será verificado.

Figura A.1 - Layout da Calcula Timber CLT.

The screenshot displays the 'CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 0.98' interface. It is divided into several sections:

- DADOS DE ENTRADA:** Fields for 'Nome' (L1) and 'Vão (cm)' (500).
- MATERIAIS E PROPRIEDADES:** 'Classe de Resistência' set to C30.
- SEÇÃO TRANSVERSAL:** A table showing layer details and a total thickness of 110 mm.

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	12000	0
T1	30	0	50
L2	40	12000	0
TOTAL	110		
- CONDIÇÕES DE CONTORNO:** Radio buttons for 'Bi-Apoiado' (selected), 'Engastado Livre', 'Bi-Engastado', and 'Apoiado Engastado'.
- CARGAS:** A diagram of a beam with a point load 'P' and a span 'vão'. A table below lists load cases:


Caso	Valor (tf/m²)	Duração
PP	0.0506	PERMANENTE
Perm	0.15	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA
- INCÊNDIO:** 'TRRF' set to 60 min.
- RESULTADOS:**
 - ELU:**
 - TENSÕES NORMAIS: $\sigma_{s0}(Max) = 0,11$ MPa; $\sigma_{s0}(Max)/\sigma_{Pd} = 0,76$ %
 - TENSÕES DE CISALHAMENTO: $\tau_{s0}(Max) = 0,02$ MPa; $\tau_{s0}(Max)/\tau_{Pd} = 8,59$ %
 - ELS:**
 - FLECHA INSTANTÂNEA: $d_{Max(t0)} = 0,00$ cm; $L/d_{Max(t0)} > 500 = 27.469,30$
 - FLECHA FINAL: $d_{Max(tool)} = 0,00$ cm

(Fonte: próprio autor).

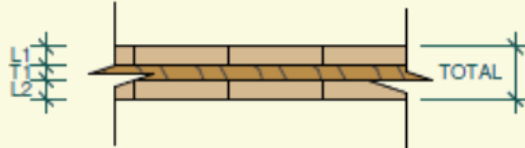
A Calcula Timber CLT verifica painéis de CLT compostos por 3, 5 e 7 lamelas de madeira posicionadas perpendicularmente entre si. A calculadora possui uma biblioteca que contém as principais seções transversais de painéis disponibilizadas no mercado. Há também a possibilidade de o usuário criar suas próprias configurações de painel (Figura A.2).

Figura A.2 - Preenchimento manual das seções transversais.

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca  ou Número de Camadas 3 5 7

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	12000	0
T1	30	0	50
L2	40	12000	0
TOTAL	110		



(Fonte: próprio autor).

Adicionalmente, o usuário possui a opção de selecionar a classe de resistência da madeira que melhor se adequa ao seu projeto (Figura A.3). É importante destacar que, em geral, os fabricantes internacionais disponibilizam painéis de CLT produzidos com madeiras de coníferas de classes de resistência C24, C28 e C32.

Figura A.3 - Opções de classes de resistência do CLT.

CLASSE DE RESISTÊNCIA

NBR 7190

Classe	fb,k (MPa)	fr,k* (MPa)	E0,m (MPa)	G90* (MPa)	ρm (kg/m³)
C14	14	0.7	7000	50	350
C16	16	0.7	8000	50	370
C18	18	0.7	9000	50	380
C20	20	0.7	9500	50	390
C22	22	0.7	10000	50	410
C24	24	0.7	11000	50	420
C27	27	0.7	12000	50	450
C30	30	0.7	12000	50	460
C35	35	0.7	13000	50	480
C40	40	0.7	14000	50	500
C45	45	0.7	15000	50	520
C50	50	0.7	16000	50	550

* Valores estimados da EN 16351

Ok

(Fonte: próprio autor).

A Calcula Timber CLT dimensiona as lajes de CLT considerando as verificações de Estado Limite Último (Figura A.4), de Estado Limite de Serviços (Figura A.5) e de painéis em Situação de Incêndio (Figura A.6). A calculadora realiza os seguintes cálculos:

- Cálculo e verificação das tensões normais originadas por esforços de flexão;
- Cálculo e verificação das tensões de cisalhamento (*rolling-shear*);

Figura A.4 - Verificação do Estado Limite Último do CLT.

VERIFICAÇÃO ELU				
kmod = kmod1 * kmod2				
kmod utilizado em função do caso e duração do carregamento				
Caso	Kmod	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)	Duração
Peso Próprio	0,60	12,86	0,23	PERMANENTE
Permanente	0,60	12,86	0,23	PERMANENTE
Acidental	0,70	15,00	0,27	LONGA
ELS Inicial	1,00	21,43	0,39	LONGA
ELS Final	1,00	21,43	0,39	LONGA
ELU	0,70	15,00	0,27	LONGA
VERIFICAÇÃO MOMENTO FLETOR ELU				
Caso	$M_{Sd(Max)}$	$\sigma_{Sd(Max)}$ MPa	$\sigma_{Sd(Max)}/\sigma_{Rd}$	Situação
Peso Próprio	0,33	1,65	0,13	Ok
Permanente	0,97	4,91	0,38	Ok
Acidental	1,94	9,81	0,65	Ok
ELU	4,69	23,74	1,58	Não Ok
$\sigma_{sd} = M_{sk} \gamma_f / W_{t_Liq}$				

(Fonte: próprio autor).

- Cálculo e verificação dos deslocamentos imediatos;
- Cálculo e verificação dos deslocamentos a longo prazo, considerando a fluência do material associada à duração dos carregamentos;

Figura A.5 – Verificação do Estado Limite de Serviço do CLT.

ELS			
$\psi_2 : 0,3$			
Vão : 720 (cm)			
I Efetivo : 10.357,25 (cm ⁴)			
I Efetivo / I Liq: 0,95			
VERIFICAÇÃO ELS			
Verificação no estado Inicial (t0): $L/d_{max}(t0) > 500$			
Verificação no estado final (too): $L/d_{max}(too) > 300$			
Caso	$d_{Max(t)}$	$L/d_{Max(t)}$	Situação
Peso Próprio(t0)	1,42	507,09	OK
Permanente(t0)	4,21	171,06	Não OK
Acidental(t0)	8,42	85,53	Não OK
ELS Inicial(t0)	14,05	51,26	Não OK
ELS Final(too)	18,94	38,02	Não OK

(Fonte: próprio autor).

- Cálculo e verificação das tensões normais dos painéis em situação de incêndio;
- Cálculo e verificação das tensões de cisalhamento (*rolling-shear*) dos painéis em situação de incêndio.

Figura A.6 - Verificação do CLT em situação de incêndio.

INCÊNDIO

kfi : 1,15 (mm/min)
 nfi : 0,6 (mm/min)
 TRRF : 60 (min)
 β1 : 0,65 (mm/min)
 β2 : 1,3 (mm/min)
 dchar : 39,00 (mm)
 def : 46,00 (mm)
 Considerar delaminação: Não

GEOMETRIA EM INCÊNDIO

Camada	Espessura (mm)	E0 (MPa)	G0 (MPa)
L1	40,0	12000	0
T1	24,0	0	50
L2	0,0	0	0

(Fonte: próprio autor).

A verificação do CLT em situação de incêndio considera as duas opções de cálculo apresentadas pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190. Ou seja, existe a possibilidade de dimensionamento das placas de CLT considerando o método da carbonização linear (adesivos resistentes ao fogo) ou o método da carbonização bilinear (adesivos não resistentes ao fogo, com a previsão do deslocamento das lamelas), conforme ilustrado pela Figura A.7.

Figura A.7 - Aba de ponderadores para a verificação dos painéis de CLT.

COEFICIENTES DE MINORAÇÃO DE RESISTÊNCIA

ywb = 1.4 ywv = 1.8

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD1

Classe de Carregamento	kmod1
Permanente	0.6
Longa Duração	0.7
Média Duração	0.8
Curta Duração	0.9
Instantânea	1.1

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD2 E DE FLUÊNCIA Φ

Classe de Umidade	Uamb	Ueq	kmod2	Φ	Seleção
1	Uamb < 65%	12%	1	0.6	<input checked="" type="radio"/>
2	65% < Uamb < 75%	15%	0.9	0.8	<input type="radio"/>
3	75% < Uamb < 85%	18%	0.8	0.8	<input type="radio"/>

LIMITES DE DESLOCAMENTO

δinst = L / 500
 δfinal = L / 300

COMBINAÇÕES

Valores dos Fatores de Combinação e de Redução

Ações	ψ0	ψ1	ψ2	ACIDENTAL
Edificações Residenciais	0.5	0.4	0.3	<input checked="" type="radio"/>
Edificações Comerciais, Escritórios	0.7	0.6	0.4	<input type="radio"/>
Biblioteca, Arquivos, Garagens	0.8	0.7	0.6	<input type="radio"/>
Vento	0.6	0.3	0	<input type="radio"/>

Casos	Peso Próprio	Permanente	Acidental
Peso Próprio	1	0	0
Permanente	0	1	0
Acidental	0	0	1
ELS Inicial	1	1	1
ELS Final	1.6	1.6	1.18
ELU	1.3	1.4	1.5
Incêndio	1.3	1.4	1.5

INCÊNDIO

Considerar Delaminação

β1 = 0.65
 β2 = 1.3
 kfi = 1.15
 nfi = 0.6

OK

(Fonte: próprio autor).

Na mesma aba de seleção do tipo de adesivo (Figura A.7), é possível alterar os coeficientes de minoração de resistência, os coeficientes de modificação e de fluência bem como selecionar os limites de deslocamentos máximos instantâneos e a longo prazo.

As lajes de CLT podem ser calculadas como biapoizadas, biengastadas (contínuas), apoiadas/engastadas e em balanço. É possível acrescentar carregamentos distribuídos por área e cargas pontuais (Figura A.8). Os carregamentos sempre são associados à duração das cargas e existe a possibilidade de realizar combinações automáticas de acordo com o uso da edificação. Tal opção também é fornecida na aba de ponderadores da calculadora (Figura A.7).

Figura A.8 - Considerações de carregamentos sobre os painéis de CLT.

CARGAS

Distribuidas Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0.0506	PERMANENTE
Perm	0.15	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF min

(Fonte: próprio autor).

A calculadora fornece ao usuário a opção de selecionar o painel mais otimizado para as condições informadas nos dados de entrada. A seleção do painel mais econômico é realizada automaticamente meio da busca na biblioteca de seções transversais.

Por fim, a Calcula Timber CLT possui a opção de impressão do relatório de resultados, que apresenta as principais considerações utilizadas na análise das lajes. Não há a necessidade da instalação do software TQS para o uso da calculadora Calcula Timber CLT, que é disponibilizada gratuitamente no site <https://www.tqs.com.br/apps/calculatimber-clt/t1im2ber>.