

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS

**Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira
Laminada Colada em Situação de Incêndio**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

SÃO CARLOS

2016

GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS

**Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira
Laminada Colada em Situação de Incêndio**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto

SÃO CARLOS

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A378a Antunes Martins, Gisele Cristina
Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio / Gisele Cristina Antunes Martins; orientador Carlito Calil Junior; coorientador Jorge Munaiar Neto. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Estruturas de Madeira. 2. Madeira Laminada Colada (MLC). 3. Incêndio. 4. Forno Horizontal. 5. Análise Experimental. 6. Análise Numérica. 7. Abaqus. 8. Temperaturas Elevadas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS**

Título da tese: "Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio"

Data da defesa: 29.07.2016

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Carlito Calil Junior (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Armando Lopes Moreno Junior**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Julio Cesar Molina**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP)

Profª. Drª. **Ângela do Valle**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Alberto Costa**

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO
participação por
videoconferência

Aos meus pais, com amor e gratidão por todo apoio e confiança. Aos meus queridos irmãos, pelo incentivo, amor e amizade. Serei eternamente grata por ter vocês em minha vida.

AGRADECIMENTOS

“*Vê mais longe a gaivota que voa mais alto*” Richard Bach. O meu carinho e eterna gratidão a minha família. Pai, você é força e a coragem que eu preciso para nunca fraquejar diante das dificuldades. Mãe, você é a luz que me sinaliza o porto. Gil, Pô, Fran, vocês tem o dom de me retirar do caos. Bruninha, Livia e Lorenzo, vocês são presentes e bênçãos de Deus na minha vida.

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento aos supervisores da minha tese, Prof. Dr. Carlito Calil Junior e Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto. Em particular, gostaria de agradecer ao Prof. Calil pela excepcional orientação, constante encorajamento, apoio e compromisso durante o desenvolvimento do meu projeto.

Aos pesquisadores do ETH - Zúrique, pela orientação que foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Em especial, ao Prof. Dr. Andrea Frangi, Dr. Michael Klippel e MSc. Pedro Palma.

Ao Samuel, que cumpriu a função de técnico, marceneiro e até mesmo bombeiro.

Ao se iniciar na vida acadêmica não conseguimos majorar o quanto desafiador será o processo. Os meus sinceros agradecimentos aos amigos que me ajudaram a passar por esse período sem perder a lucidez.

Um carinho especial eu dedico a pessoa que foi meu irmão e minha família em São Carlos... Muito obrigada Fabio, você trouxe pessoas e gatinhos especiais para a minha vida. Ênio, você foi à pessoa que mais me surpreendeu com o tempo de convivência e agradeço a oportunidade de ser sua amiga. David, a sua bondade e amizade foram reconhecidas pela Toto, nunca vou me esquecer disso. Laura, acredito que foi Deus que te trouxe a minha vida, pois sua amizade, bondade e carisma apareceram quando eu mais precisava. Léo, acredito que você cumpriu a função do meu anjo da guarda aparecendo nos momentos certos. Ellen, fotógrafa oficial da tese, obrigada pelo companheirismo no último ano.

As minhas amigas que me emprestam o colo, o coração, o ouvido. Não importa a cidade, o estado ou o país, vocês estão sempre comigo e sei que sempre estarão. Vocês são essenciais na minha vida.

Ao apoio e incentivo para o desenvolvimento de pesquisas em estruturas de madeiras: Montana Química S.A; ITA Construtora, Berneck. Em especial, ao Jackson Vidal e Humberto Tufolo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa (Projeto Nº 2013/ 07548-1) e do projeto regular (Projeto Nº 2013 / 25401-8).

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas pela acolhida e apoio para desenvolvimento do projeto.

“Se não houver frutos, valeu a beleza das flores.

“Se não houver flores, valeu a sombra das folhas.

Se não houver folhas, valeu a intenção das sementes”

Maurício Ceolin

RESUMO

MARTINS, G. C. A. **Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio**. 2016. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Elementos estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC) têm sido muito utilizados na América do Norte e na Europa. Entretanto no Brasil há restrições quanto ao uso, principalmente, em razão da insegurança diante de potenciais riscos relacionados a incêndios. Este trabalho investigou o comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de MLC expostos à curva de incêndio-padrão ISO 834, preparados com duas espécies de madeira (*Eucalyptus* e *Pinus*) sem adição de tratamentos preservantes. Adicionalmente, elementos tratados com preservante ignífugo a base Borato de Cobre Cromatado (MOQ[®] OX 50-CCB-O) ou tratamento retardantes ao fogo (OSMOGUARD[®] FR100) também foram utilizados para analisar a influência na carbonização. O objetivo principal da pesquisa foi analisar a resistência ao fogo de elementos de MLC, avaliando a influência da espécie de madeira, a influência da densidade, bem como os efeitos dos tratamentos preservantes. O programa experimental foi realizado no forno horizontal a gás instalado no Departamento de Engenharia das Estruturas – EESC/USP, com dimensões internas de 3m x 4m x 1,5m, e as análises numéricas foram implementadas no pacote computacional ABAQUS. O modelo numérico, com vistas ao monitoramento a deflexão no meio do vão e a avaliação da distribuição da temperatura ao longo da profundidade dos elementos, foram desenvolvidos e os resultados obtidos foram comparados com os dados obtidos por meio das análises experimentais. Métodos de cálculo propostos por diferentes autores e regulamentações internacionais foram aplicados para verificação das propostas de dimensionamento em situação de incêndio. A comparação dos resultados mostrou que a utilização dos métodos de dimensionamento (simplificado ou avançado) representa risco à segurança contra incêndio caso utilize valores para a taxa de carbonização das espécies nacionais determinados a partir dos métodos de cálculo ou normas internacionais.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira. Madeira Laminada Colada (MLC). Incêndio. Forno Horizontal. Análise Experimental. Análise Numérica. Taxa de Carbonização. Segurança contra incêndio.

ABSTRACT

MARTINS, G. C. A. **Numerical and Experimental analysis of glued laminated timber in fire situation.** 2016. 197 p. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Structural elements of Glued Laminated Timber (glulam) have long been used in North America and Europe, but their use is still restricted in Brazil for safety reasons, especially related to potential risks in face of fire. The present work investigated the thermal and mechanical behavior of structural elements of glulam exposed to fire standard ISO 834. The glued laminated timber was produced from two wood species (*Eucalyptus* and *Pinus*) without any treatments. However, elements treated with wood treatments like Copper Chrome Boron (MOQ® OX 50 -CCB-O) or fire retardant treatment (OSMOGUARD® FR100) were also used to investigate their influence on charring. The main objective of this study was to assess the fire resistance of the glulam elements, evaluating the influence of wood species and, consequently, the influence of density, as well as the effects of preservative treatment. The experimental program was carried out in a gas oven, with internal dimensions of 3m x 4m x 1.5m, and the numerical analyses were performed by ABAQUS. The numerical analyses aimed to monitor the deflection in the middle of the span as well as the temperature distribution along the depth of the elements. The results obtained from both the experimental and numerical analyses were compared. Calculation methods proposed by different authors and international regulations have been applied for verification of the proposed design in fire. A comparison of the results show that the use of calculation methods (simplified and advanced) represents a risk to fire safety in case of using the values of char rate for Brazilian wood species determined from the calculation methods.

Keywords: Timber. Glued Laminated Timber (Glulam). Fire. Horizontal Furnace. Experimental Analysis. Numerical Analysis. Char rate. Fire Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Componentes a serem considerados para a avaliação de estruturas em segurança contra incêndio. Fonte: Adaptado de Östman et al. (2010)	5
Figura 1.2: Vista geral do Laboratório de Incêndio do EMPA em Dübendorf: Fonte: Arquivo EMPA	10
Figura 1.3: Laboratório de Incêndio SP: (a) Forno vertical; (b) Forno horizontal. Fonte: Arquivo pessoal.....	10
Figura 2.1: Cobertura da torre construída no antigo Hygiene Institute Zürich, Suíça. Fonte: Wikipédia	12
Figura 2.2: (a) Arena de esporte em Livorno, Itália. (b) Ponte pedonal em parque das Nações em Lisboa.	14
Figura 2.3: Shopping Iguatemi em Fortaleza, Brasil. Fonte: Website Carpinteria.	14
Figura 2.4: Leonardo Bridge em Oslo, Istambul.	14
Figura 2.5: Estruturas afetadas por altas temperaturas: (a) perfis de aço; (b) elemento de concreto armado.	18
Figura 2.6: Estruturas de madeira afetadas por temperaturas elevadas. Fonte: Website AV Studio.....	19
Figura 2.7: Seção transversal de elementos de madeira após a exposição ao fogo. Fonte: Arquivo pessoal.....	19
Figura 2.8: Configuração de termopares em elementos de MLC. Fonte: Yang et al. (2009a).....	24
Figura 2.9: Preparação do ensaio com posicionamento da viga. Fonte: Zhaopeng e Peifang (2012)	26
Figura 2.10: Layout do arranjo experimental (dimensões em milímetros). Fonte: Lange et al. (2014).....	27
Figura 2.11: Posicionamentos dos elementos e isolamentos . Fonte: Arquivo pessoal.	27
Figura 2.12: Termopares: (a) interior do forno; (b) equipamentos para instalação no interior da seção.....	28
Figura 2.13: Ilustração do posicionamento dos termopares (medidas em mm). Fonte: Lange et al. (2014).....	28

Figura 2.14: Distribuição de temperatura: (a) curva de incêndio-padrão; (b) curva paramétrica com uma fase curta de aquecimento. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014)	29
Figura 2.15: Distribuição de temperatura: curva paramétrica com uma fase longa de resfriamento. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014)	29
Figura 2.16: Taxa de carbonização dos elementos. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014).....	30
Figura 2.17: Layout do posicionamento dos termopares nas amostras de MLC. Fonte: Kallander e Lind (2001)	32
Figura 2.18: Amostras de MLC: (a) posicionamento no interior do forno; (b) amostras para avaliação da seção transversal residual. Fonte: Kallander e Lind (2001) 32	
Figura 2.19: Ensaio: (a) preparação do CP (b) Carregamento. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004).....	34
Figura 2.20: Modos de falha: (a) falha na madeira fora da linha de cola, (b) falha do adesivo, (c) falha de coesão do adesivo. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004). 34	
Figura 2.21: Ensaio de Tração: (a) Posicionamento no equipamento; (b) Layout do modelo numérico. Fonte: Klippel, Frangi, Fontana (2011)	36
Figura 2.22: (a) Corpo de Prova; (b) Forno vertical. Fonte: Degiovani, Segundinho, Calil Jr. (2011).....	37
Figura 2.23: Elementos Expostos ao fogo: (a) layout da distribuição dos termopares; (b) carbonização da madeira. Fonte: adaptado de Harada et al. (2012)	38
Figura 2.24: Ensaio de resistência: (a) Layout do CP; (b) Máquina de Ensaio. Fonte: Harada et al. (2012)	39
Figura 2.25: Seção transversal residual com diferentes tipos de adesivos. (a) RF; (b) EPI; (c) PVAc Fonte: Harada et al. (2012)	40
Figura 2.26: Forno horizontal para ensaios. Fonte: Adaptação Klippel, Frangi e Fontana (2012).....	41
Figura 2.27: Layout do elemento analisado. Fonte: Adaptação Klippel, Frangi e Fontana (2012).....	41
Figura 2.28: Variações da porcentagem de esforço máximo aplicado durante os ensaios. Fonte: Klippel (2014).....	43
Figura 2.29: Tipos de ruptura: (a) falha na emenda ao longo dos fingers; (b) falha no finger joint; (c) falha mista; (d) falha na região fora da emenda. Fonte: Klippel (2014)	44

Figura 2.30: Perfil de temperatura depois de 30 e 60 minutos de exposição ao fogo. Adaptado de Klippel (2014).....	45
Figura 2.31: Dimensões dos corpos de prova em mm, profundidade de 5 mm. Fonte: Klippel (2014)	46
Figura 2.32: Tipos de ruptura: (a) no finger joint; (b) fora da região da emenda; (c) tipo misto de falha. Fonte: Klippel (2014).....	46
Figura 3.1: Lote de elementos estruturais de MLC: (a) Lyptus®; (b) Pinus.	50
Figura 3.2: Elementos estruturais da espécie Pinus depois de realizado o tratamento preservante.....	51
Figura 3.3: Ensaio de flexão simples.....	52
Figura 3.4: Diagrama força aplicada versus flecha na flexão.....	53
Figura 3.5: Instrumentação para medição dos deslocamentos transversais no meio do vão.	54
Figura 3.6: Elementos estruturais após a ruptura (a) Lyptus® (L1); (b) Pinus (P5)	55
Figura 3.7: Layout da extração de corpos de prova dos elementos (dimensões em mm).....	56
Figura 3.8: Corpos de prova de compressão: (a) Layout com as dimensões em mm; (b) amostras de Lyptus®	56
Figura 3.9: Ensaio de Compressão Paralela às fibras: (a) visão geral do equipamento, (b) amostra de Pinus antes do ensaio; (c) amostra de Pinus depois de ocorrido o ensaio.	57
Figura 3.10: Processo de preparação dos corpos de prova. (a) Serra de Fita; (b) Plaina.	58
Figura 3.11: Layout dos corpos de prova de tração paralela às fibras.....	59
Figura 3.12: Máquina para ensaios de tração marca METRIGUARD.....	59
Figura 3.13: Aparato de Ensaio Schlyter Modificado: (a): Dispositivo (visão geral); (b) Posicionamento das amostras; (c) Distribuidor de chamas.	61
Figura 3.14: Dispositivo para distribuidor de chamas	61
Figura 3.15: Painéis depois de expostos a chamas: (a) FR 100 DAP; (b) FR100 (II).....	64
Figura 3.16: Painéis depois de expostos a chamas: (a) FR 400 (I); (b) FR 400 Normal.....	64

Figura 3.17: Painéis depois de expostos a chamas com o tratamento FR 100 Normal Autoclave.....	64
Figura 3.18: Painéis sem tratamento depois de expostos a chamas.....	65
Figura 3.19: Forno Horizontal para ensaios de lajes e vigas: (a) visão geral (b) detalhes do interior	67
Figura 3.20: Curva de Aquecimento tempo versus temperatura.	69
Figura 3.21: Layout do posicionamento de distribuição das vigas por ensaio (dimensões em mm)	70
Figura 3.22: Preparação dos termopares: (a) Equipamento para soldagem das extremidades; (b) conectores.	71
Figura 3.23: Layout da distribuição dos termopares: (a) Lyptus®; (b) Pinus. Dimensões em milímetros.	72
Figura 3.24: Distribuição dos termopares ao longo do comprimento do elemento. Dimensões em milímetros.	72
Figura 3.25: Posicionamento dos termopares: (a) furos na face superior (b) Broca com prolongadores.....	73
Figura 3.26: Face de inserção dos termopares.....	73
Figura 3.27: Posicionamento dos elementos estruturais para a realização dos ensaios.	74
Figura 3.28: Quadro de apoio: (a) Fabricação; (b) Layout da estrutura de apoio e sistema de remoção.....	75
Figura 3.29: Visão Geral do Equipamento de Ensaio com viga de rolamento para remoção do quadro de apoio.....	75
Figura 3.30: Posicionamento do quadro: (a) Durante o ensaio; (b) Finalização com extinção das chamas residuais.	76
Figura 3.31: Revestimento do quadro de apoio: (a) layout proposto; (b) execução do isolamento.....	76
Figura 3.32: Etapas de montagem da estrutura de isolamento.	77
Figura 3.33: Posicionamentos das placas isolantes ao redor das vigas para fechamento do forno.	78
Figura 3.34: Processo de resfriamento das vigas imediatamente após o ensaio.	79
Figura 3.35: Layout dos cortes realizados para determinação da seção transversal residual.	80
Figura 3.36: Preparação das seções para avaliação da carbonização.	80

Figura 3.37: Avaliação da seção transversal residual.....	80
Figura 3.38: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P3.....	81
Figura 3.39: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P6.....	82
Figura 3.40: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L6.....	83
Figura 3.41: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L5.....	83
Figura 3.42: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P8.....	84
Figura 3.43: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P7.....	84
Figura 3.44: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L8.....	85
Figura 3.45: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L4.....	85
Figura 3.46: Seção remanescente dos elementos de MLC depois de expostos ao fogo por 31 minutos.....	86
Figura 3.47: Relação entre a densidade e o momento de inércia da seção transversal remanescente.....	87
Figura 3.48: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P9 - FR.....	90
Figura 3.49: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P10 - FR.....	90
Figura 3.50: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P11 - CCB.....	91
Figura 3.51: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P12 - CCB.....	91
Figura 3.52: Detalhes do elemento tratado com o preservante CCB depois de exposto ao fogo por 30 minutos: (a) face superior, (b) seção transversal; (c) detalhe da rachadura na face inferior.....	93
Figura 3.53: Face inferior dos elementos com tratamento: (a) OSMOGUARD® FR 100; (b) MOQ®-CCB.....	93

Figura 3.54: Retirada dos elementos após o ensaio: (a) sem tratamento; (b) com tratamento.	94
Figura 3.55: Seção transversal dos elementos preparados com madeira de Lyptus	95
Figura 3.56: Seção transversal dos elementos preparados com madeira de Pinus	95
Figura 3.57: Posicionamento da viga no interior do forno: (a) visão geral; (b) detalhe do apoio nos consoles.	96
Figura 3.58: Isolamento da face superior do elemento.....	96
Figura 3.59: Sistema de aplicação de carga: (a) cilindro hidráulico; (b) prolongador isolado; (c) célula de carga.....	97
Figura 3.60: Sistema de leitura de deformações: (a) transdutor de fio; (b) posicionamento de transdutores.....	97
Figura 3.61: Sistema de leitura de deformações: (a) Posicionamento dos transdutores; (b) gancho para fixação dos fios para controle do deslocamento da viga.	98
Figura 3.62: Layout da montagem do ensaio com aplicação de carga (flexão à três pontos).	98
Figura 3.63: Isolamento nas laterais do forno horizontal.	99
Figura 3.64: Layout de posicionamento dos termopares. Dimensões em mm. ..	99
Figura 3.65: Detalhes da ligação circular resistente à momento.	100
Figura 3.66: Ensaio de flexão a três pontos em elementos estruturais.	101
Figura 3.67: Interior do forno (a) Queimadores ligados; (b) Queimadores desligados após o ensaio.....	101
Figura 3.68: Evolução temporal da flecha no meio do vão dos elementos.	103
Figura 3.69: Evolução temporal da temperatura no interior da seção identificada como S2.	104
Figura 3.70: Vigas Carbonizadas após a retirada do interior do forno horizontal.	104
Figura 3.71: Instrumentação para determinação do Módulo de Elasticidade... ..	105
Figura 3.72: Ensaio para determinação da força de ruptura.	105
Figura 3.73: Seção transversal Residual: (a) (b) Lyptus®; (c) (d) Pinus.	106
Figura 3.74: Ligação: (a) Pino metálico; (b) região de ligação após a ruptura.	107
Figura 4.1: Relação entre condutividade e temperatura para a madeira e o carvão. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.	109

Figura 4.2: Relação do calor específico e a temperatura para a madeira e o carvão. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.	110
Figura 4.3: Fator de redução para a densidade com o aumento da temperatura.	111
Figura 4.4: Fator de redução para resistência paralela às fibras para coníferas. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.....	112
Figura 4.5: Fator de redução no MOE paralelo às fibras para coníferas. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.....	112
Figura 4.6: Modelo Térmico: (a) Malha; (b) Gradiente de Temperatura; (c) Isoterma de 300°C em destaque.....	114
Figura 4.7: Carbonização em diferentes tempos de exposição para a espécie Pinus	116
Figura 4.8: Seção Transversal do elemento: (a) Refinamento da malha no modelo térmico; (b) distribuição dos termopares nos elementos preparados para ensaio.	117
Figura 4.9: Modelo Térmico T1 – LP30: Gradiente de temperatura no interior da seção transversal.....	117
Figura 4.10: Modelo Térmico T2 – LP40: Gradiente de temperatura no interior da seção transversal.	118
Figura 4.11: Relação entre a densidade e a taxa de carbonização a partir do modelo numérico.....	119
Figura 4.12: Evolução da temperatura a partir do modelo numérico para as vigas de Lyptus e Pinus.....	120
Figura 4.13: Evolução da temperatura para a viga L4 a partir do modelo numérico e o experimental.	121
Figura 4.14: Seção Transversal Residual da viga L4: (a) Modelo Numérico; (b) Experimental.....	121
Figura 4.15: Ilustração da malha utilizada no modelo térmico tridimensional.	123
Figura 4.16: Seção Transversal residual: (a) Numérico – Lyptus; (b) Experimental Lyptus; (c) Numérico – Pinus, (d) Experimental – Pinus.....	124
Figura 4.17: Ilustração do modelo térmico para o elemento constituído de madeira Lyptus®.	125
Figura 4.18: Evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus®. ..	125
Figura 4.19: Evolução da temperatura no interior do elemento de <i>Pinus</i>	126

Figura 4.20: Distribuição da temperatura: (a) Modelo Mecânico; (b) Modelo Térmico.....	127
Figura 4.21: Comparação do perfil na análise Térmica e na análise Termoestrutural.	127
Figura 4.22: Características do modelo numérico aplicado nas análises.....	128
Figura 4.23: Reação da força distribuída para os apoios.	129
Figura 4.24: Evolução temporal do deslocamento no meio do vão.....	129
Figura 4.25: Evolução temporal do deslocamento no meio do vão.....	130
Figura 4.26: Seção transversal do elemento: (a) Modelo Numérico; (b) Layout disponível em Harada et al. (2012).....	131
Figura 4.27: Seção transversal residual: (a) Ensaio em grande escala; (b) Modelo Térmico.	132
Figura 4.28: Perfil de aquecimento: (a) Dados experimentais; (b) Modelo térmico desenvolvido.....	132
Figura 4.29: Evolução da temperatura por meio do modelo numérico versus o experimental.	133
Figura 5.1: Redução da seção transversal do elemento pelo método de Lie. Fonte: Adaptado de TR10 (2014).....	135
Figura 5.2: Fator de carga (Z) como uma porcentagem da capacidade de projeto.	136
Figura 5.3: Relação entre a taxa de carbonização e a densidade das espécies de madeira.	142
Figura 5.4: Evolução temporal da temperatura de acordo com as normas e dados de ensaio.	143
Figura 5.5: Redução das dimensões da seção transversal: (a) Exposição em três faces; (b) Exposição em quatro faces. Fonte: adaptado TR10 (2003).....	144
Figura 5.6: Detalhes da seção residual de acordo com o método proposto pela EN 1995-1-2.	145
Figura 5.7: Ilustração da espessura carbonizada: (a) uma direção; (b) duas direções.....	145
Figura A.1: Ensaio de flexão na viga de MLC à temperatura ambiente (a) visão geral do ensaio; (b) detalhe do carregamento aplicado.	162
Figura A.2: Posicionamento dos termopares: (a) realização de furos pela face lateral; (b) layout de distribuição dos termopares com dimensões em centímetros.	163

Figura A.3: (a) Isolamento da face superior; (b) Sistema de apoio e restrição à torção da viga.....	164
Figura A.4: Curvas de aquecimentos em diferentes profundidades na seção transversal.....	164
Figura A.5: Retirada da viga após o ensaio.	165
Figura A.6: Seção transversal após o ensaio.	165
Figura A.7: Viga no interior do forno depois de encerrado o ensaio e resfriamento do forno.	166
Figura B.1: Representação do tipo de conexão a momento.....	167
Figura B.2: Representação do tipo de conexão a momento.....	167
Figura B.3: Layout da ligação resistente a momento.	168
Figura B.4: Visão geral do layout para preparação da emenda e ligações. Dimensões em centímetros.....	169
Figura B.5: Detalhe do layout para preparação da emenda e ligações. Dimensões em centímetros.....	169
Figura B.6: Ligação: (a) sem preenchimento; (b) com preenchimento com cavilha de madeira.	170
Figura B.7: Pinos metálicos confeccionados para a ligação.....	171
Figura B.8: Preparação do corte para emenda.....	171
Figura B.9: Detalhe do corte e molde para a realização da ligação.....	171
Figura B.10: Detalhe da ligação finalizada.....	172
Figura B.11: Vista superior dos elementos finalizados com a conexão.	172
Figura B.12: Vista superior dos elementos finalizados com a conexão.	172
Figura C.1: Revestimento térmico realizado nos ensaios para avaliação de carbonização.....	173
Figura C.2: Resfriamento dos elementos após o ensaio.	174
Figura C.3: Padrão de carbonização depois de 30 minutos de exposição: (a) Lyptus; (b) Pinus.....	175
Figura C.4: Padrão de carbonização do Pinus depois de 30 minutos de exposição: (a) FR 100; (b) CCB.....	175
Figura C.5: Elementos estruturais de MLC depois de expostos ao fogo por 30 minutos.....	176
Figura C.6: Vigas de Lyptus no interior do forno depois de encerrado o ensaio termestrutural.....	177

Figura C.7: Vigas de Lyptus no interior do forno depois de removida a tampa.

..... 177

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Faixas de temperatura em que ocorreram falhas. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004).....	35
Tabela 2.2: Principais contribuições a respeito do comportamento de adesivos em temperaturas elevadas. (continua)	47
Tabela 3.1: Características do lote de elementos de MLC de Lyptus®.	50
Tabela 3.2: Características físicas do lote de elementos de MLC da espécie Pinus.	51
Tabela 3.3: Resultados obtidos nos ensaios de flexão a três pontos.....	55
Tabela 3.4: Características Físicas das amostras para o ensaio de compressão. (Continua).....	57
Tabela 3.5: Características Físicas das amostras para o ensaio de tração. (continua).....	60
Tabela 3.6: Identificação das amostras analisadas.	62
Tabela 3.7: Resultados dos ensaios	63
Tabela 3.8: Altura da área carbonizada nos painéis.	63
Tabela 3.9: Classificação dos materiais exceto revestimento de piso.	66
Tabela 3.10: Informações sobre os ensaios para avaliação da Taxa de Carbonização	70
Tabela 3.11: Dados obtidos por meio da análise da carbonização dos elementos.	87
Tabela 3.12: Valores para a taxa de carbonização dos elementos de MLC em estudo.....	88
Tabela 3.13: Dados obtidos por meio da análise da carbonização dos elementos com tratamentos preservantes.....	92
Tabela 3.14: Valores para a taxa de carbonização dos elementos de MLC com tratamentos preservantes.....	92
Tabela 3.15: Dados obtidos a partir do ensaio em temperaturas elevadas	102
Tabela 3.16: Dados obtidos após o ensaio a flexão com as vigas carbonizadas	106
Tabela 4.1. Relação das propriedades dos materiais com a temperatura. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.	111
Tabela 4.2: Fatores de redução para as propriedades mecânicas de acordo com a EN 1995-1-2: 2004.	112

Tabela 4.3: Informações referentes aos ensaios no forno horizontal.....	115
Tabela 4.4: Informações referentes aos elementos utilizados nos ensaios no forno horizontal.....	115
Tabela 4.5: Dados obtidos a partir do modelo térmico bidimensional. (continua)	118
Tabela 4.6: Propriedades mecânicas utilizadas nas análises	122
Tabela 4.7: Dados obtidos a partir do modelo numérico em temperaturas elevadas	130
Tabela 5.1: Equações propostas por T. T. Lie (1977) para a determinação da resistência ao fogo.	135
Tabela 5.2: Aplicação do método de T. T. Lie (1977).....	136
Tabela 5.3: Valores de taxa de carbonização propostos pela EN 1995-1-2. (continua).....	139
Tabela 5.4: Dados necessários para o cálculo da taxa de carbonização	140
Tabela 5.5: Taxa de Carbonização determinada a partir dos métodos de cálculo	141
Tabela 5.6: Espessura carbonizada e espessura efetiva. Dimensões em milímetros.....	146
Tabela 5.7: Seção Transversal a partir do MSTR. Dimensões em milímetros.	147
Tabela B.1: Dados necessários para realizar o dimensionamento da ligação...	169
Tabela B.2: Dados determinados para o dimensionamento da ligação	170

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1. Objetivo	5
1.2. Justificativa	6
1.3. Estudos desenvolvidos no Brasil	7
1.4. Metodologia	9
1.5. Estrutura da Tese	11
2. ESTADO DA ARTE.....	12
2.1. Informações Gerais	12
2.1.1. Adesivos Estruturais	15
2.1.2. Tratamentos Preservantes	17
2.2. Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio	18
2.2.1. Redução das propriedades na seção transversal residual.....	20
2.2.2. Taxa de Carbonização.....	20
2.2.3. Ensaio em temperaturas elevadas.....	23
2.2.4. Comportamento dos adesivos em Situação de Incêndio.....	31
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	49
3.1. Informações Gerais	49
3.2. Elementos de Estudo.....	49
3.3. Caracterização das Propriedades das Madeiras	52
3.3.1. Ensaio de Flexão Simples	52
3.3.2. Ensaio de Compressão Paralela às fibras	55
3.3.3. Ensaio de tração paralela às fibras	58

3.4.	Ensaio de Propagação de Chamas.....	60
3.4.1.	Amostras	61
3.4.2.	Resultados e Discussões.....	62
3.4.3.	Ensaio no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).....	65
3.5.	Ensaio em temperaturas elevadas.....	67
3.5.1.	Forno Horizontal a gás	67
3.5.2.	Avaliação da carbonização dos elementos estruturais	69
3.5.3.	Ensaio Termoestruturais	96
4.	ANÁLISE NUMÉRICA	108
2.3.	Princípios básicos nos modelos de elementos finitos.	108
2.4.	Análise de Elementos de Madeira Laminada Colada	113
2.4.1.	Modelo Bidimensional	114
2.4.2.	Modelo Tridimensional	122
5.	MÉTODOS DE CÁLCULO TEÓRICO PARA A TAXA DE CARBONIZAÇÃO	134
5.1.	Informações Gerais	134
5.2.	Determinação da resistência ao fogo – Método de Lie.....	134
5.2.1.	Aplicação do Método	136
5.3.	Determinação da taxa de carbonização.....	137
5.3.1.	Método proposto por E. L. Schaffer (1967).....	137
5.3.2.	Método proposto por R. H. White (1988).....	138
5.3.3.	Norma Australiana AS 1720.4: 1990	138
5.3.4.	Norma Europeia EN 1995 – 1 – 2: 2004.....	139
5.3.5.	Aplicação dos Métodos	140
5.4.	Determinação da Seção Transversal Residual	143
5.4.1.	Método da Seção Transversal Reduzida (MSTR).....	143
5.4.2.	Aplicação do Método	146

6.CONCLUSÕES.....	148
6.1. Análise Experimental.....	148
6.1.1. Avaliação da Taxa de Carbonização	148
6.1.2. Análise Termestrutural.....	150
6.2. Análise Numérica	151
6.2.1. Modelo Bidimensional.....	151
6.2.2. Modelo Tridimensional.....	152
6.3. Métodos Teóricos	152
6.3.1. Determinação da Resistência ao Fogo	153
6.3.2. Determinação da Taxa de Carbonização.....	153
6.4. Sugestões para trabalhos futuros.....	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
APÊNDICE A – Ensaio Preliminar	162
APÊNDICE B – Procedimentos para dimensionamento da ligação.....	167
APÊNDICE C – Registro Fotográfico	173

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Elementos estruturais de madeira são utilizados como materiais de construção desde o início da civilização devido alta rigidez e resistência. O aumento do uso de elementos de madeira na construção traz benefícios para uma estratégia climática contribuindo com a sustentabilidade no futuro.

Centros de pesquisa internacionais realizaram importantes estudos nas últimas décadas para caracterizar, regulamentar e fomentar o uso da madeira. Todavia, no Brasil, a aplicação da madeira como material de construção ainda é pouco utilizada, apesar de todos os fatores favoráveis em relação à madeira que o território nacional oferece.

A combustibilidade da madeira é uma entre as muitas razões que influenciam nas legislações e normatizações para edificações e, conseqüentemente, restringem o uso de estruturas de madeira como material de construção. A segurança contra incêndio é uma contribuição para minimizar o risco à vida, sendo um importante critério para a escolha dos materiais de construção.

A compreensão do comportamento básico do incêndio e da estrutura durante a exposição ao fogo é uma importante condição para desenvolver uma estratégia de segurança bem sucedida. Na prática, as estratégias adotadas devem variar consideravelmente, dependendo da ênfase em proteção passiva ou ativa, tipo e uso da edificação.

Portanto, para adotar estratégias de segurança se faz necessário estabelecer procedimentos a serem utilizados e como aplicá-los. Os métodos são fornecidos em normas e manuais técnicos internacionais, que apresentam regras em termos de classes e valores numéricos para assegurar a segurança em estruturas em situação de incêndio.

Os princípios básicos a serem considerados em legislações de segurança contra incêndio de edificações são pontuados em Östman et al. (2010), sendo:

- a. Ocupantes deverão ser capazes de deixar a edificação ou serem resgatados;

- b. A segurança da equipe de resgate deve ser levada em conta;
- c. As estruturas devem resistir ao incêndio por um tempo mínimo requerido;
- d. A deflagração e propagação do fogo e fumaça devem ser limitadas;
- e. A propagação do fogo para construções vizinhas deve ser limitada.

Os diferentes níveis que estabelecem a segurança contra incêndios são ilustrados na Figura 1.1.

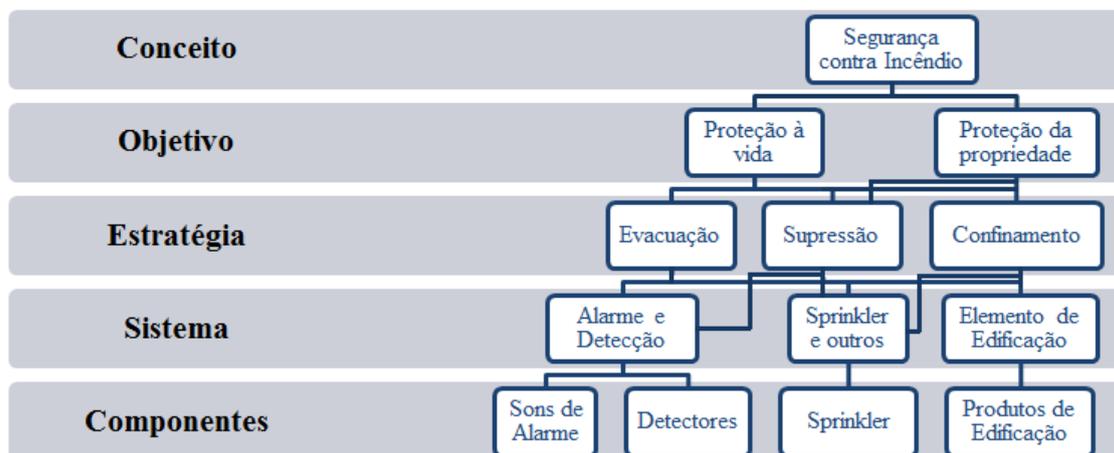


Figura 1.1: Componentes a serem considerados para a avaliação de estruturas em segurança contra incêndio.
Fonte: Adaptado de Östman et al. (2010)

Tendo em vista os aspectos mencionados, o presente trabalho compõe um estudo do comportamento de elementos de Madeira Laminada Colada (MLC) em situação de incêndio. No estudo foram avaliadas espécies de madeira nacionais oriundas de florestas plantadas utilizadas para a preparação dos elementos estruturais, a fim de contribuir com informações para elaboração de manuais técnicos para aplicação na construção de edificações adequadas ao nível de segurança exigido.

1.1. Objetivo

A pesquisa desenvolvida investiga o comportamento estrutural de elementos de Madeira Laminada Colada (MLC) em situação de incêndio, tendo como base os dados experimentais obtidos em ensaios realizados no Laboratório de Segurança ao Incêndio do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Tendo como proposta verificar os métodos de cálculo simplificado e avançado propostos pelo Eurocódigo 5 (EN 1995:1-2: 2004), no que diz respeito ao cálculo da camada carbonizada, e consequente seção transversal residual de elementos preparados

com espécies de madeira nacionais. Bem como, a verificação de métodos teóricos de cálculo para a determinação da resistência ao fogo e taxa de carbonização das espécies.

Com base nos resultados e na análise dos métodos simplificado e avançado propostos pela norma pretendem-se avaliar os valores de parâmetros mais apropriados a serem aplicados para as madeiras de espécies brasileiras. Tendo como finalidade contribuir para a elaboração de um manual técnico e regulamentação a serem utilizados por engenheiros e arquitetos.

1.2. Justificativa

Nas últimas décadas, centros de pesquisas internacionais realizaram importantes estudos sobre o desempenho de estruturas de madeira em situação de incêndio a fim de garantir e difundir a utilização da madeira como material de construção.

Todavia, no Brasil, a aplicação da madeira como material de construção ainda é pouco utilizada e as pesquisas desenvolvidas sobre o comportamento dos elementos em temperaturas elevadas são escassas e estão aquém do que é realizado internacionalmente, apesar de todos os fatores favoráveis em relação à madeira que o território nacional oferece.

A norma brasileira em vigência ABNT NBR 7190:1997 “*Projeto de Estruturas de madeira*”, não apresenta informações e diretrizes para o dimensionamento em situação de incêndio. Entretanto, está sendo revisada e tem como proposta a inclusão do método simplificado de dimensionamento proposto pela EN 1995-1-2: 2004 “*Eurocode 5: Design of timber Structures – Part 1-2: General – Structural fire design*”, incluindo os valores de taxa de carbonização.

Os valores de taxa de carbonização propostos na norma Eurocode 5 foram determinados após uma extensa série de ensaios com espécies de madeira utilizadas no mercado europeu. Portanto, deve-se verificar a aplicabilidade dos valores de taxa de carbonização para as espécies nacionais.

Até o momento as pesquisas na área das Estruturas de madeira em situação de incêndio no Brasil abordaram análises experimentais em modelos reduzidos e análises numéricas. Entretanto, por meio de um Projeto Temático junto à FAPESP intitulado *Segurança das estruturas em situação de incêndio* (Processo número: 2006/06742-5), foi adquirido um forno horizontal de ensaios, com dimensões internas de 3,0 x 1,5 x 4,0 m³, instalado nas dependências do Laboratório de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos/USP, sendo possível a realização de ensaios de elementos

estruturais em escala real submetida a ações mecânicas e térmicas decorrentes do incêndio.

1.3. Estudos desenvolvidos no Brasil

Atualmente, no Brasil, no contexto das estruturas de madeira em situação de incêndio, foram abordados temas referentes à influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas, estudos paramétricos do comportamento ao fogo de elementos de madeira e determinação da taxa de carbonização, dentro do campo da modelagem numérica e experimental com modelos reduzidos. Abaixo é apresentada uma breve descrição de trabalhos desenvolvidos.

O trabalho de mestrado de Aguillar Filho (1986), intitulado “*Combustibilidade e tratamento ignífugo da madeira*” teve como objetivo o estudo teórico-experimental sobre a combustibilidade e os tratamentos ignífugos da madeira. O autor projetou e construiu dois aparatos de ensaio, sendo um próprio para o teste de corpos de prova tratados por impregnação sobre pressão e outro para tratamentos por meio de revestimento superficial da madeira. Foi observado com base nestes resultados que quanto maior a densidade do material, maior a sua resistência inicial à ação do fogo, para espécies de alta densidade (maior que 1000 kg/m³) não se justifica o tratamento por impregnação sob pressão.

Um trabalho em nível de mestrado desenvolvido por Pinto (2001), na EESC – USP, intitulado “*Proteção contra incêndio para habitações em madeira*”. Apresentou detalhes construtivos adotados em países como Áustria, Canadá, Suíça e Japão visando aumentar a segurança contra incêndio em habitações de madeira, assim como o panorama da segurança contra incêndio no Brasil. Com isso, demonstrou-se a viabilidade da proteção e segurança contra incêndio das habitações de madeira e quais são os meios para ser alcançada.

O trabalho desenvolvido em nível de doutorado por Pinto (2005), intitulado “*Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o Eucalyptus Citriodora e E. grandis*” apresentou dois modelos de taxa de carbonização para a madeira de eucalipto das espécies Citriodora e Grandis, sendo um para peças de madeira com pequenas dimensões (17,2 x 17,2 x 6,0 cm³) e outro para as vigas estruturais (0,16 x 0,26 x 2,00 m³). Durante os ensaios experimentais, as vigas foram expostas ao incêndio-padrão seguindo a curva proposta pela ASTM E119, com aquecimento em quatro faces. Os ensaios experimentais foram executados em um forno

vertical de ensaios disponível no Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Construtivos de Furnas – Centrais Elétricas S.A., localizado em Aparecida de Goiânia – GO.

Outro trabalho desenvolvido em nível de mestrado por Manriquez (2008), na UFSC, intitulado “*Influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do Paricá*”, determinou a influência da temperatura sobre as resistências ao embutimento, paralelo e perpendicular às fibras, do Paricá (*Schizolobium amazonicum*), foram realizados ensaios em 15 faixas de temperatura situadas entre 20 e 230°C.

No trabalho de doutorado de MANRIQUEZ, M.J (2012), intitulado “*Fatores de redução das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura*” foi avaliada a influência da temperatura nas resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática, para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*, oriundas de florestas plantadas do estado de Santa Catarina, do Paraná e da região amazônica, quando submetidas à temperatura entre 20 e 230 °C. Foram determinados fatores de redução para estas propriedades que considera o efeito da temperatura, tanto para folhosas quanto para resinosas e proposto um fator de modificação necessário na ABNT NBR 7190:1997, a fim de que este seja incorporado ao dimensionamento de projeto de estruturas de madeira submetidas a temperaturas elevadas, seja ela oriunda de incêndio ou não.

SILVA, M.R. (2012) em sua tese intitulada “*Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto Citriodora e Pinus Taeda*”, avaliou o comportamento em peças estruturais das espécies *Eucalyptus citriodora* e *Pinus taeda*, tratadas termicamente nas temperaturas de 160, 180, 200, 220 e 240 °C e, para o pinus, até a temperatura de 260 °C.

A pesquisa em nível de pós-doutorado realizada por MOLINA, J. C (2013) e intitulada “*Estudo de ligações metálicas de sistemas mistos de madeira e concreto em situação de incêndio*”, teve por finalidade estudar o comportamento de ligações metálicas de sistemas mistos de madeira e concreto em situação de incêndio. Foram consideradas três principais abordagens: teórica, numérica e experimental. Os corpos-de-prova mistos e vigas mistas foram ensaiados em temperatura ambiente e em situação de incêndio para a verificação do comportamento da ligação mista, a partir da consideração de carregamentos de projeto. Os ensaios em temperaturas elevadas foram

os primeiros realizados no forno horizontal disponível no departamento de estruturas EESC-USP.

1.4. Metodologia

A contribuição principal do trabalho desenvolvido com elementos estruturais de MLC foi a determinação da taxa de carbonização das espécies brasileiras, sendo este o principal parâmetro para descrever o comportamento ao fogo de estruturas de madeira. Para a realização do trabalho utilizaram-se duas madeiras com propriedades mecânicas e classes distintas, sendo Lyptus (folhosa), classe de resistência C60 e o Pinus (conífera), classe de resistência C30. A avaliação da influência de tratamentos preservantes na carbonização foi realizada com a utilização do preservante ignífugo MOQ[®] OX 50-CCB-O e do retardantes de chamas, OSMOGUARD[®] FR 100, ambos produzidos pela empresa Montana Química S.A.

Inicialmente foi realizada uma extensa pesquisa tendo como finalidade preparar a revisão bibliográfica, bem como estudar a execução de ensaios em temperaturas elevadas. Este foi o primeiro trabalho de doutorado desenvolvido com a utilização do equipamento adquirido em 2010, portanto não havia no laboratório um técnico qualificado para a realização dos ensaios.

Um ensaio preliminar foi executado tendo como finalidade verificar a calibração do forno e a instrumentação necessária para ensaios. Os resultados encontram-se nos anexos do trabalho.

Durante o período de janeiro a abril de 2014, a autora deste trabalho realizou um estágio no ETH, Instituto Federal Suíço de Tecnologia, localizado na cidade de Zurique, sob supervisão do Professor Dr. Andrea Frangi. O estágio teve como foco principal à discussão sobre a metodologia a ser adotada em ensaios com elementos de madeira. Foi possível no período discutir a análise experimental e numérica com os pesquisadores Dr. Michael Klippel, autor da tese intitulada “Fire Safety of bonded Structural timber elements” e o doutorando Pedro Palma, bem como, acompanhar a realização de ensaios no Instituto de pesquisas e serviços interdisciplinares (EMPA -Figura 1.2), localizado em Zurique, e no Instituto Técnico de Pesquisa da Suécia (SP – your Science Partner - Figura 1.3), localizado na cidade de Borås.

No Instituto SP além de acompanhar a realização de ensaios foi possível discutir a metodologia que havia sido elaborada com o auxílio dos pesquisadores do ETH, com

o pesquisador Dr. David Lange, autor principal do artigo intitulado “*Charring rate of timber in natural fire*”.

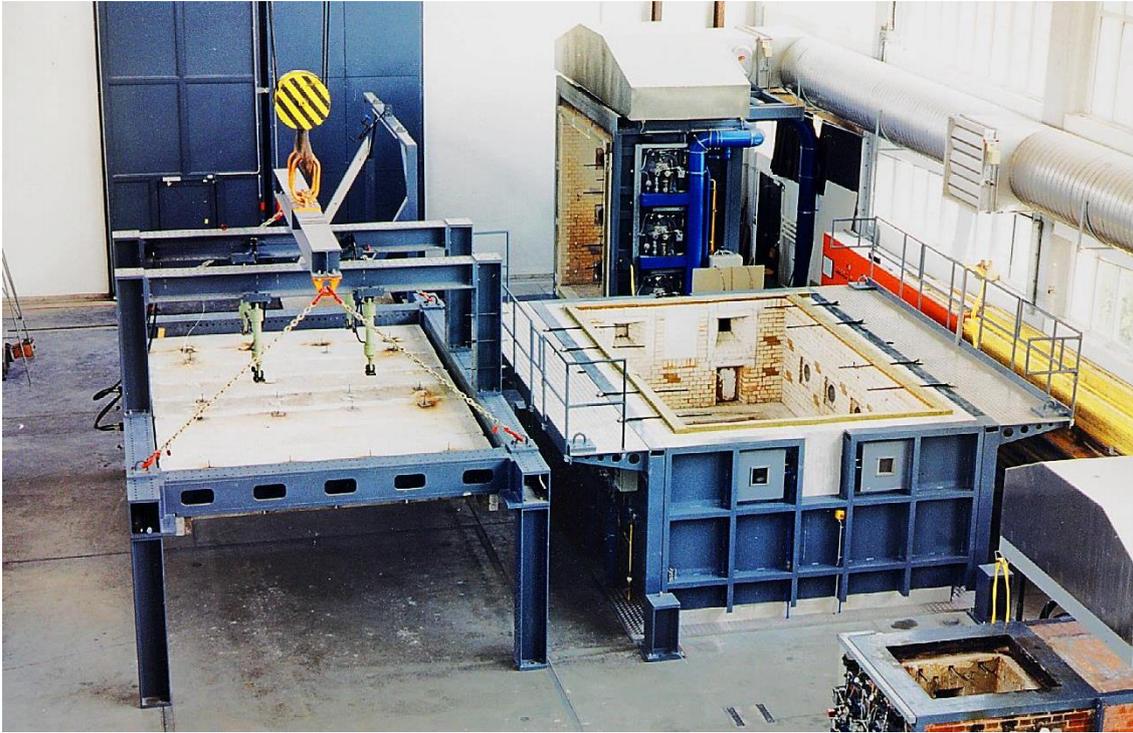


Figura 1.2: Vista geral do Laboratório de Incêndio do EMPA em Dübendorf: Fonte: Arquivo EMPA

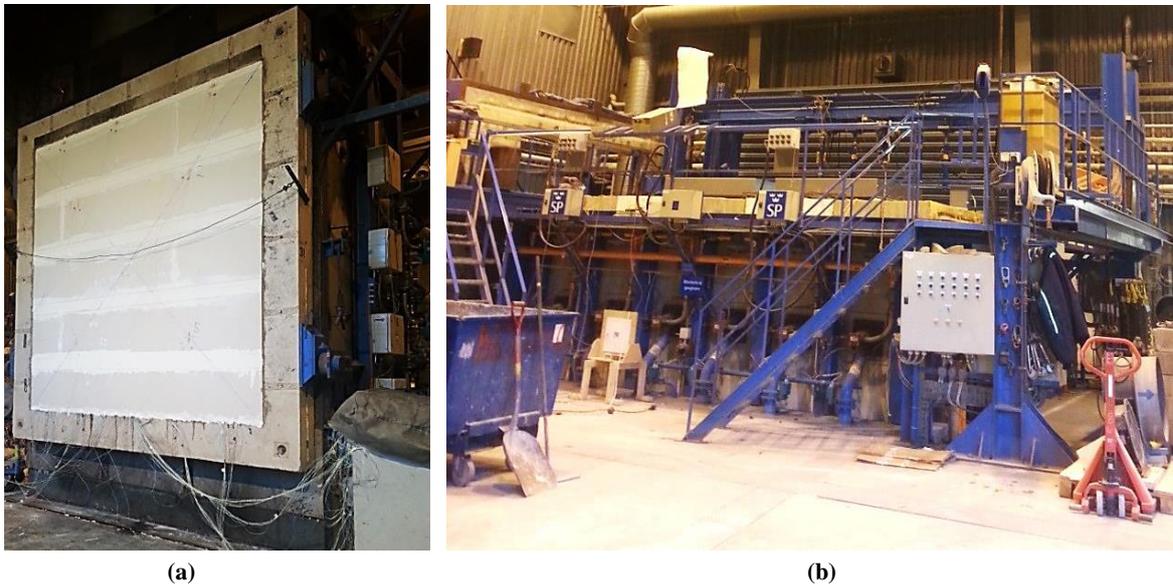


Figura 1.3: Laboratório de Incêndio SP: (a) Forno vertical; (b) Forno horizontal. Fonte: Arquivo pessoal

A realização dos ensaios foi possível devido ao financiamento concedido pela FAPESP por meio do Projeto Regular Nº 2013/25401-8, intitulado “*Análise Experimental e Numérica de Elementos Estruturais submetidos à flexão em situação de Incêndio*”.

1.5. Estrutura da Tese

No **Capítulo 1** uma breve abordagem do tema foi realizada, apresentando os objetivos e justificativas para a realização do trabalho, assim como a metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto.

O **Capítulo 2** apresenta o estado de arte com base em ensaios em temperaturas elevadas realizados com elementos estruturais de Madeira Laminada Colada e as suas principais contribuições. Inicialmente, abordam-se os principais conceitos sobre os elementos de MLC Finalizando o capítulo com a discussão sobre o comportamento dos elementos de madeira em temperaturas elevadas.

No **Capítulo 3** o programa experimental realizado foi apresentado e discutido. Bem como, é detalhada a metodologia adotada e os resultados obtidos.

No **Capítulo 4** foi abordada a análise numérica discutindo os princípios básicos aplicados nos modelos de elementos finitos de acordo com a proposta de método de cálculo avançado disponibilizado na Eurocode 5.

No **Capítulo 5** é realizada uma análise teórica com a aplicação dos métodos teóricos de cálculo para determinação da taxa de carbonização. Incluindo o método de cálculo simplificado para determinação da seção transversal residual proposto pela Eurocode 5.

O **Capítulo 6** foi dedicado às conclusões e discussões finais obtidas por meio dos ensaios. No capítulo foi avaliada a eficiência dos métodos teóricos de cálculo para dimensionamento de projetos desenvolvidos no país com espécies de madeira brasileira.

Capítulo 2

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Informações Gerais

Estruturas de madeira com conexões coladas têm sido usadas por mais de 100 anos. Em 1906, Otto Hetzer recebeu a primeira patente relativa a estruturas horizontais de Madeira Laminada Colada. O projeto da patente apresentou um componente com pilares verticais e transição para bordas curvas, além de vigas inclinadas. Em outras palavras, tratava-se de uma estrutura de pórtico em MLC. A patente de Hetzer foi estendida além da Alemanha e em 1893 foi finalizada uma obra de cobertura de um auditório em Basel, na Suíça. Em pouco tempo, Hetzer aumentou a produção, e em torno de 1917, empregava aproximadamente 300 trabalhadores.

Algumas estruturas de Hetzer ainda permanecem em serviço, como a cúpula da cobertura da torre construída em 1911 na Suíça, no antigo Hygiene Institute Zurich, atualmente parte da Universidade de Zurique, mostrada na Figura 2.1.



Figura 2.1: Cobertura da torre construída no antigo Hygiene Institute Zürich, Suíça. Fonte: Wikipédia¹

¹Disponível em: < https://en.wikipedia.org/wiki/Glued_laminated_timber>. Acesso em: Jun. 2016.

Elementos de Madeira Laminada Colada (MLC) são produtos de madeira fabricados por lamelas de madeira serradas coladas em linhas horizontais. A PN NBR 7190: 2013 define “Madeira Laminada Colada” para fins estruturais, como sendo peças de madeira, reconstituída em processo industrializado de fabricação, composta de tábuas de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final, coladas umas às outras e dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça final.

Na produção das lamelas, as tábuas são unidas longitudinalmente por ligação de extremidade com extremidade, até se atingir o comprimento necessário para a composição final da peça. Na produção dos elementos, as lamelas são sobrepostas até atingir a seção transversal determinada no dimensionamento da peça estrutural. As peças compostas sob a técnica da MLC podem assumir formato reto ou curvo. A qualidade do produto final depende de varias etapas do processo de fabricação, de modo que a capacidade de resistência e rigidez dos elementos de MLC é garantida pelos fabricantes por meio do controle de qualidade de cada componente do processo.

A principal vantagem de elementos de MLC em relação a elementos de madeira maciços está associada ao fato de as seções transversais e o comprimento dos elementos não serem determinados pelo tamanho das toras. Sendo assim, diferentes dimensões referentes a larguras de perfis estruturais, incluindo formas curvas, são facilmente alcançadas.

Outro benefício verificado é a uniformidade da umidade no interior dos elementos, fato que se garante na confecção dos elementos estruturais em razão de as lamelas resultarem muitas finas, uma vez que a velocidade de secagem da madeira é diretamente dependente da espessura das tábuas que a formam. Devido ao controle durante a secagem, e ao cuidado durante as outras etapas de manufatura, distorções e fissuras resultam bastante reduzidas, sendo que esses fatores têm efeitos benéficos na capacidade resistente e na rigidez. (METTEM, 1988)

De acordo com Mettem (1988), outra vantagem dos elementos de MLC é a resistência em ambientes corrosivos. O produto final é favorável a aplicação em construções para estocagem de produtos químicos e estruturas industriais, que podem ser afetadas devidas as adversidades do processo que abriga.

A aplicação de estruturas de MLC pode ser observada em variadas formas estruturais. A sua utilização vai desde pequenas passarelas e escadas até grandes estruturas sob as mais variadas formas, como ilustrado pelas Figura 2.2 a Figura 2.4.



(a)

(b)

Figura 2.2: (a) Arena de esporte em Livorno, Itália. (b) Ponte pedonal em parque das Nações em Lisboa.



Figura 2.3: Shopping Iguatemi em Fortaleza, Brasil. Fonte: Website Carpinteria.²

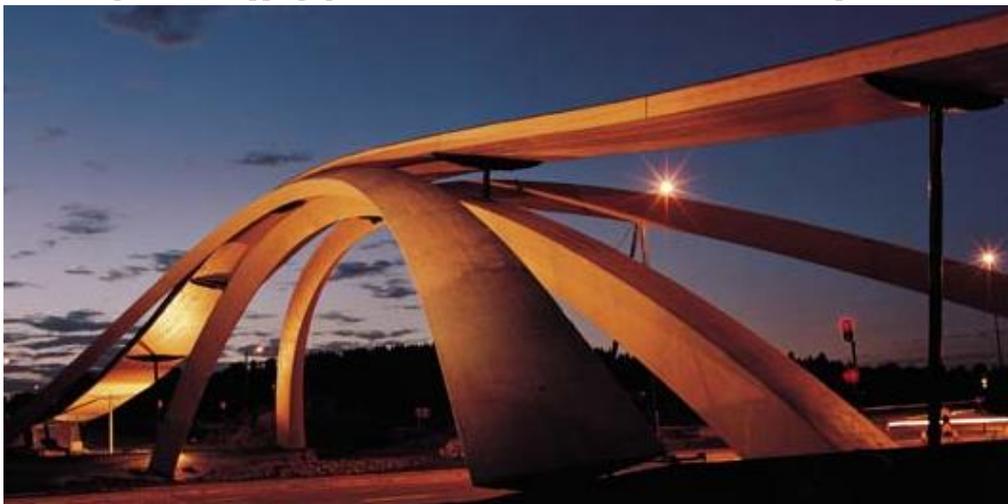


Figura 2.4: Leonardo Bridge em Oslo, Istanbul.

² Disponível em: < <http://www.carpinteria.com.br/>>. Acesso em: Jun. 2016.

2.1.1. Adesivos Estruturais

As características anatômicas da madeira influenciam na colagem devido à variabilidade da densidade e a porosidade que ocorrem nos lenhos inicial e tardio, cerne e alburno, e lenho juvenil e adulto, além da influência da instabilidade dimensional do lenho de reação, assim como o da direção da grã, em que a penetrabilidade depende da direção de corte. (Bodig e Jayne, 1993).

Nos últimos anos, adesivos a base de poliuretano monocomponente tornaram-se populares no mercado Europeu para a fixação de elementos estruturais de madeira. As principais vantagens do adesivo são: linha de cola incolor, fácil aplicação de um adesivo monocomponente, e endurecimento rápido dentro de uma a três horas sem aplicação de calor. A quantidade de adesivo necessária por metro quadrado e por linha de cola é de, aproximadamente, 200 gramas.

Os adesivos à base de resorcinol formaldeído e fenol-resorcinol-formaldeído tem sido utilizados há décadas para fixar elementos estruturais de madeira, sendo caracterizados pela alta resistência, durabilidade e resistência à umidade. Adesivos à base de epóxi não são utilizados usualmente em elementos de MLC. Entretanto possuem um importante campo de aplicação para fixação de conectores em madeira e reforços.

As condições climáticas de utilização, a espécie de madeira, o tratamento preservativo usado e os métodos de fabricação, devem ser analisados para a escolha dos adesivos estruturais.

A Norma chilena NCh 2148: 2013 – “*Madera Laminada Estructural : Requisitos o Inspección*” descreve as classes de uso nas quais os elementos estruturais laminados devem se esquadrear. Sendo eles:

- Classe de Uso 1 – para ambientes internos, protegidos de intempéries, como chuva, elevadas temperaturas e excessos de umidade. Caracteriza-se por um teor de umidade nos materiais correspondentes a uma temperatura de 20 ± 2 °C, bem como umidade relativa do ar em torno de 65%.

- Classe de Uso 2 – para uso em ambientes externos com cobertura, como por exemplo, lavanderias, que apresentam aquecimentos e alta umidade relativa e amplia as variações climáticas de umidade e temperatura. Caracteriza-se por um teor de umidade nos materiais correspondentes a uma temperatura de 20 ± 2 °C, bem como umidade relativa do ar em torno de 85%.

○ Classe de Uso 3 – para uso em ambientes externos, corresponde a ambientes agressivos, nos quais o teor de umidade da madeira fica acima de 19%, por um longo período de tempo, como é o caso de ambientes com exposição direta ao tempo, com temperaturas superiores a 30°C e alta umidade relativa. Caracteriza-se pelas condições climáticas que permitem o teor de umidade acima dos valores estipulados para a classe de uso 2.

A norma chilena classifica os adesivos em dois tipos de acordo com a classe de utilização, sendo tipo I ou tipo II. Tem a finalidade de garantir a integridade das ligações durante a vida útil dos elementos, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Classificação do tipo de adesivo. Fonte: Traduzido de NCh 2148: 2013

Classe de Uso	Tipo de Ambiente	Teor de Umidade da Madeira (%)	Temperatura	Tipo de Adesivo
1	Interior	≤ 12%	< 50°C	I
2	Exterior Coberta	≤ 18% para madeiras sem preservação	< 50°C	I
		≤ 20% para coníferas com preservação	Qualquer	II
3	Exterior	Qualquer	Qualquer	II

No caso de elementos tratados com retardantes ao fogo, devem ser utilizados adesivos do tipo I, pois a água incluída no preservativo submete o adesivo a condições de umidade própria da classe de uso 3.

Adesivos para utilização em elementos estruturais considerando a exposição em temperaturas elevadas, de acordo com a EN 1995-1-2: 2004 devem produzir ligações com capacidade resistente e durabilidade de modo que a integridade da cola seja mantida no tempo de resistência ao fogo requerido. Para fixação de madeira em madeira, madeira e materiais à base de madeira ou materiais à base de madeira em materiais à base de madeira, adesivos de fenol formaldeído e tipos de amino plásticos para adesivos tipo 1, devem estar de acordo com a EN 301, enquanto que adesivos para madeira compensada e LVL devem seguir as recomendações da EN 314 para a escolha do adesivo. A Eurocode 5 ressalta o fato de que a temperatura de amolecimento de alguns adesivos é inferior a temperatura de carbonização da madeira.

2.1.2. Tratamentos Preservantes

A preservação da madeira tem a função de desenvolver processos e produtos que visem o retardamento de sua deterioração. Nenhuma espécie de madeira, nem mesmo aquelas de reconhecida durabilidade natural, são capazes de resistir, indefinidamente, às intempéries, variações das condições ambientais, ataque de microrganismos e ação do próprio homem. Os agentes físicos, químicos e biológicos, atuando em conjunto ou, separadamente, na madeira, aceleram seu processo de deterioração. A madeira é degradada, pois os agentes biológicos reconhecem nos polímeros naturais da parede celular a fonte de nutrição, retirando daí a energia necessária para a sua sobrevivência. A madeira também sofre a influência das variações da temperatura, da precipitação pluviométrica e das substâncias químicas presentes no meio. Além de outros fatores de destruição da madeira, tais como o fogo, poluição e radiação ultravioleta. (Revista da Madeira, 2007).

São inúmeras as vantagens e opções de utilização. Entretanto a madeira apresenta algumas desvantagens, como biodegradação, flamabilidade, degradação por radiação ultravioleta, ácido e bases, bem como variações dimensionais consideráveis, em função da absorção ou perda da umidade. Para impedir ou atenuar a deterioração da madeira, são utilizadas substâncias que aumentam a resistência da madeira, como preservantes ignífugos e acabamentos superficiais.

O uso final do elemento de madeira tratado deve ser considerado como um fator relevante da escolha do produto preservante a ser utilizado. A escolha do produto também deve levar em conta os efeitos indesejados dos produtos que poderiam prevenir o ataque por agentes xilófagos no local em que a madeira será instalada.

Em Moreschi (2013) são apontadas as características dos produtos preservantes que são relacionados pela AWWA (American Wood Protection Association - Associação Americana de Preservados de Madeira), sendo:

- O preservante deve ser tóxico aos organismos xilófagos;
- A qualidade como preservante deve ter fundamento em dados de campo e/ou obtidos de madeira em serviço;
- O preservante deve possuir propriedades químicas e físicas satisfatórias, que governem a sua integridade sob as condições para as quais ele é recomendado;
- Deve ser isento de qualidades indesejadas para uso e manuseio;
- Deve ser submetido a controles satisfatórios, de laboratórios e de usinas;

○ Deve estar à disposição no mercado, sob o fornecimento de patentes correntes e em uso comercial atual.

2.2. Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio

Elementos de Madeira Laminada Colada (MLC) apresentam um bom desempenho estrutural em temperaturas elevadas. Estes não derretem ou distorcem como elementos de aço (Figura 2.5.a), ou são afetados com o efeito de “*spalling*” (lascamento explosivo) como o concreto, ilustrado na Figura 2.5.b.



Figura 2.5: Estruturas afetadas por altas temperaturas: (a) perfis de aço; (b) elemento de concreto armado.

A madeira é um material combustível, que é consumido lentamente e superficialmente. A espessura de camada carbonizada formada na parte externa do elemento protege o núcleo da seção, retardando o avanço do fluxo de calor. O núcleo central da seção permanece intacto, forte e estável, sendo capaz de manter as propriedades mecânicas do elemento, como pode ser observado na Figura 2.6. As linhas de cola dos elementos não são afetadas no interior da seção que permanece inalterado pela ação do fogo, como mostrado na Figura 2.7.

De acordo com Mettem (1988), devido à condutividade térmica da madeira corresponder a apenas 3% da condutividade do aço, pode se observar distintamente a camada carbonizada e o núcleo da seção sem alterações.

Devido o fato dos elementos de MLC terem boa resistência ao fogo, pode-se projetar estruturas para longos períodos de exposição ao fogo, sem a necessidade de utilizar uma proteção especial, como retardantes ao fogo.



Figura 2.6: Estruturas de madeira afetadas por temperaturas elevadas. Fonte: Website AV Studio³



Figura 2.7: Seção transversal de elementos de madeira após a exposição ao fogo. Fonte: Arquivo pessoal.

A exposição ao fogo reduz as dimensões da seção transversal da madeira, assim como a resistência e rigidez da zona aquecida próxima à linha de carbonização. Segundo Yang et al. (2009.a), para o cálculo da capacidade resistente da seção deve se conhecer a degradação térmica da madeira (taxa de carbonização) e a distribuição da temperatura nos elementos expostos ao fogo.

³ Disponível em: < <https://evstudio.wordpress.com/category/projects-in-process/page/5/>>. Acesso em: Jun. 2016.

2.2.1. Redução das propriedades na seção transversal residual

Quando a madeira é exposta ao fogo, tanto a madeira quanto o carvão oriundo da combustão são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da seção, abrandando a velocidade da degradação térmica e retardando o avanço da frente de carbonização.

Como observado por Figueroa e Moraes (2009) quando submetidos ao fogo, os elementos estruturais de madeira exibem em seus interiores, após a camada carbonizada, uma estreita camada aquecida, cujas propriedades mecânicas são afetadas pelo calor e um núcleo inalterado.

Segundo Pinto (2005), a redução das propriedades mecânicas é outro fator a ser considerado e que contribui para que o elemento estrutural de madeira perca sua capacidade de carregamento em situação de incêndio. A influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas pode se manifestar por meio de efeitos temporários e efeitos permanentes, os quais dependem do grau de degradação do material causado pela exposição ao calor e pela temperatura.

Em Figueroa e Moraes (2009) se ressalta que os efeitos permanentes não desaparecem depois do resfriamento da madeira e ocorrem a temperaturas superiores a 65°C. Em Lie (1977) se observa que estudos realizados mostraram que, de um modo geral, a resistência e o módulo de elasticidade reduzem em torno de 0,85 – 0,90 em temperaturas elevadas.

2.2.2. Taxa de Carbonização

A resistência ao fogo de elementos de madeira é criticamente influenciada pela carbonização do material. Métodos de dimensionamento devem ser capazes de prever, para um período pré-estabelecido de exposição ao fogo, a espessura carbonizada da madeira.

A espessura da camada carbonizada é a distância entre a face externa do elemento original e a posição da linha de carbonização. De acordo com a EN 1995-1-2: 2004, o limite entre o material que sofreu pirólise e o núcleo intacto da madeira pode ser admitido sendo a isotérmica de 300°C.

A velocidade com que a espessura carbonizada avança para o interior da seção é nomeado de taxa de carbonização. Desde que toda a área da madeira que sofreu pirólise

pode ser considerada carbonizada, a taxa de carbonização corresponde à taxa de propagação da frente de pirólise.

A espessura da camada carbonizada pode ser calculada pelo tempo de exposição ao fogo e a taxa de carbonização da espécie. Sob a exposição ao incêndio-padrão, uma relação aproximadamente linear entre a duração do incêndio e a espessura carbonizada foi estabelecida após numerosos ensaios em temperatura elevadas com madeira e materiais à base de madeira.

Como descrito em PINTO (2005), a taxa de carbonização é um valor dimensional essencial para a avaliação da resistência ao fogo, visto que o colapso de elementos de madeira e de seus derivados ocorrem principalmente pela redução da área resistente, ou seja, pela redução gradual da seção transversal exposta ao fogo.

A taxa de carbonização pode ser obtida tanto por meio de modelos empíricos, por meio de dados experimentais, quanto por modelos teóricos fundamentados em princípios físicos e químicos. Sendo caracterizada pela perda de massa (g/s), denominada taxa de queima, ou pelo aumento da camada carbonizada (mm/min), denominada taxa de carbonização. Ainda de acordo com PINTO (2005), os valores de taxa de carbonização são os mais difundidos por conduzir diretamente a análise da seção residual, atendendo aos interesses do estudo de peças estruturais em situação de incêndio que se baseia na redução da área resistente e na perda das propriedades de resistência e rigidez da madeira exposta a elevados gradientes de temperatura.

A taxa de carbonização da madeira depende de inúmeros fatores, como espécie de madeira, densidade, composição química, permeabilidade, condutibilidade térmica da madeira, dimensão da amostra, orientação da grã (o sentido longitudinal da madeira produz duas vezes mais carbonização que no sentido transversal). (TR10, 2003; Cachim e Franssen, 2009).

Fonseca e Barreira (2009) ressaltaram a importância da taxa de carbonização para quantificar a segurança em relação a incêndio, sendo que a madeira que não chegou à fase de pirólise mantém as propriedades originais.

Segundo Wang et. al (2013) a carbonização pode ser considerada para todas as faces do elemento de madeira diretamente exposta ao fogo. Para superfícies protegidas por revestimentos contra incêndio, outros materiais de proteção, ou elementos estruturais, a carbonização é assumida ser atrasada por um período.

A taxa de carbonização de espécies de madeira é assunto de pesquisas a décadas, tendo como finalidade investigar s parâmetros que influenciam a taxa de carbonização,

bem como propor métodos de cálculos. A seguir as contribuições mais relevantes e utilizadas como base para o desenvolvimento do presente trabalho serão apresentadas.

Schaffer (1967) observou que a taxa de carbonização é mais rápida após a ignição da superfície da madeira sob condição de incêndio – padrão e diminui até uma taxa constante após a formação de uma camada de carvão. Os parâmetros dos elementos de madeira que afetam a taxa de carbonização são densidade e teor de umidade. Concluiu também que as dimensões das fissuras e rachaduras na camada carbonizada dependem da temperatura de exposição e da densidade da espécie de madeira.

White (1988) encontrou um modelo não linear para estipular a localização da base da camada carbonizada por meio de uma análise de regressão e estabeleceu como parâmetros mais importantes para a carbonização da madeira sendo a densidade e o teor de umidade dos elementos.

Collier (1992) ressaltou a influência de parâmetros da madeira nos valores de taxa de carbonização. A densidade, considerada com a maior influência, ou seja, quanto maior a densidade da madeira, mais lenta a carbonização. Secundariamente, o teor de umidade apresenta uma influência significativa, sendo que com o aumento da umidade nos elementos há uma redução na taxa de carbonização. Espécies menos permeáveis, como Douglas Fir e White Oak, tem uma taxa mais lenta de carbonização, sendo que a permeabilidade controla a umidade no interior dos elementos. O tratamento realizado em elementos de madeira afeta a combustibilidade e resalta o fato da aplicação do preservante CCA (Copper Chrome Arsenate) contribuir para que depois de encerrada a fonte de ignição o elemento continue o processo de queima.

Frangi e Fontana (2003) determinaram valores médios para taxa de carbonização de diferentes amostras preparadas com madeira da espécie spruce (*Picea abies*) variando entre 0,67 e 0,70 mm/min, sendo a densidade em torno de 453 kg/m³. Sendo assim, observaram uma boa correlação com os valores propostos pela EN 1995-1-2. Os autores assumiram que aplicar o método simplificado proposto pelo Eurocódigo 5 é confiável desde que com tempo de exposição a curva de incêndio-padrão ISO 834 esteja entre 30 a 110 minutos.

Njankou, Dotreppe e Franssen (2004), concluíram que a densidade da espécie afeta significativamente a taxa de carbonização e recomendou valores menores do que os recomendados pelo Eurocódigo 5 para a taxa de carbonização de espécies tropicais (densidade superior a 700 kg/m³).

Yang et al. (2009.b) observaram que a espessura da camada carbonizada e a taxa de carbonização são maiores em relação a face inferior (altura) do que nas faces laterais da seção transversal dos elementos. Concluíram também que em elementos com densidades mais altas e menor tempo de exposição apresentam espessura da camada carbonizada menor do que elementos com densidades mais baixas e maior duração da exposição. Os resultados para a taxa de carbonização obtida por meio de testes mostraram um decréscimo na seguinte ordem: Taiwaniana (420 kg/m^3) > Japanese cedar (451 kg/m^3) > China fir (407 kg/m^3) > Douglas fir (512 kg/m^3) > Southern Pine (532 kg/m^3).

Lange et al. (2014) observaram por meio dos ensaios com aquecimento de acordo com a curva de incêndio – padrão, que a taxa de carbonização estimada tendo como base os registros de temperaturas no interior da seção é maior no estágio inicial de carbonização. Fato que contraria a proposta da Eurocode 5, na qual a taxa de carbonização é constante. Em ensaios com aquecimento de acordo com incêndio paramétrico nota-se a dependência da taxa de carbonização na fase de aquecimento, bem como na fase de resfriamento.

2.2.3. Ensaio em temperaturas elevadas

O comportamento de estruturas de madeira laminada colada tem sido assunto de inúmeras pesquisas. A seguir serão apresentados alguns trabalhos realizados e as principais conclusões sobre o assunto.

Em Yang et al. (2009.a) investigou-se a distribuição de temperatura no interior de elementos estruturais de MLC confeccionados com cinco tipos de espécies coníferas (Japanese cedar, Taiwaniana, China fir, Douglas fir e Southern pine) e com o adesivo à base de resina resorcinol, sendo o ensaio realizado de acordo com a norma chinesa CNS 12514 de resistência ao fogo. Duas dimensões diferentes de lamelas foram ensaiadas: 38 mm (espessura) x 190 mm (largura) x 1800 mm (comprimento) e 38 mm (espessura) x 140 mm (largura) x 1800 mm (comprimento), com termopares posicionados no interior da seção entre as lamelas (linha de cola) em diferentes profundidades, como ilustrado na Figura 2.8. Os elementos de MLC foram condicionados em uma sala com ambiente controlado com temperatura $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$, ao longo de cinco semanas antes dos ensaios.

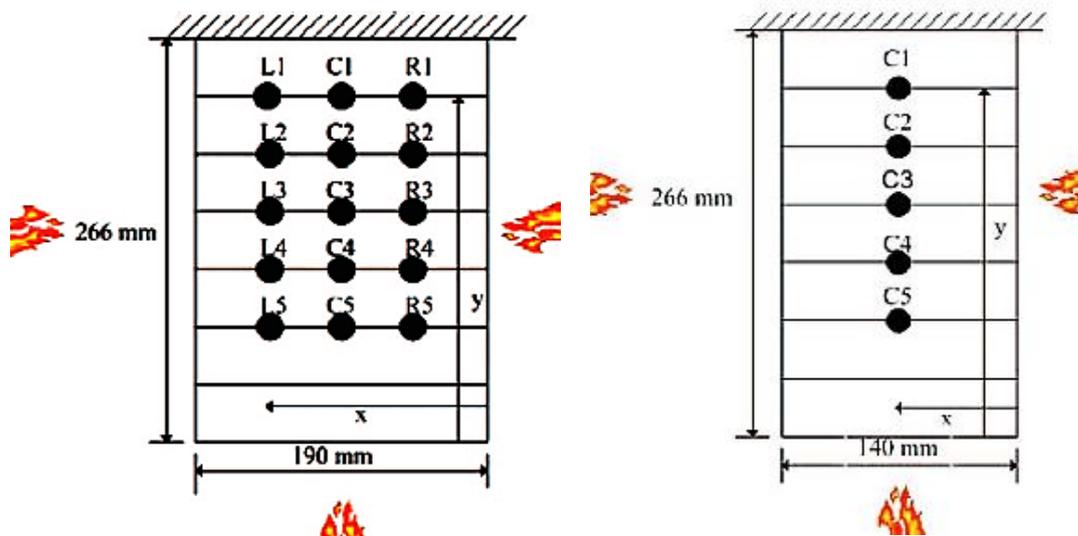


Figura 2.8: Configuração de termopares em elementos de MLC. Fonte: Yang et al. (2009a)

Os elementos foram expostos ao fogo em três faces, sendo os elementos com largura de 190 mm foram expostos ao fogo durante 30 min, 45 min, 60 min, enquanto que os elementos com dimensões menores, 140 mm de largura, foram expostos durante 30 min e 45 min.

Os resultados mostraram que a temperatura no centro da seção do elemento ensaiado aumentou com o tempo de exposição ao fogo. Observou-se também que as temperaturas nos lados direito e esquerdo aumentaram mais rápido do que no centro. Após a exposição ao fogo de 30 min e 45 min, a temperatura média no centro da seção para os elementos de MLC com 190 mm de largura variou entre 27,5 - 28,3°C e 29,5 - 33,2°C, enquanto que para a largura de 140 mm a temperatura média aumentou mais rapidamente variando de 32,3 - 51,1°C para 39, -89,3°C.

Durante a exposição ao fogo, a altura e largura da seção diminuíram gradualmente dependendo da taxa de carbonização da espécie (Taiwania >Japanese cedar > China fir > Douglas fir > Southern pine).

Em Yang et al. (2009.b), uma continuidade ao trabalho anterior em espécies coníferas, foram estudadas a espessura de carbonização, a taxa de carbonização e a taxa de perda de calor em elementos de MLC de acordo com a CNS 12514 e o método do cone calorímetro (ISO 5660).

Os ensaios foram realizados nos elementos apresentados na Figura 2.8. Após o ensaio a linha carbonizada foi removida dos elementos e foram extraídas cinco amostras de 5 mm de espessura para cada elemento.

As dimensões da seção transversal foram registradas antes e após o ensaio. Assim calculou-se a profundidade e a taxa de carbonização, a partir das equações apresentadas a seguir.

$$C_{p(l)} = (l_1 - l_2) \cdot 2 \quad \text{Equação 2.1}$$

$$C_{p(h)} = (h_1 - h_2) \quad \text{Equação 2.2}$$

$$TC_l = \frac{C_{p(l)}}{t} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$TC_h = \frac{C_{p(h)}}{t} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

$C_{p(l)}$ é a espessura média da camada carbonizada na face lateral, em milímetros;

l_1 e l_2 indicam as larguras da seção transversal dos elementos antes e após o ensaio em exposição ao fogo (mm);

h_1 e h_2 indica a altura da seção transversal dos elementos antes e após o ensaio em exposição ao fogo (mm);

$C_{p(h)}$ é a espessura média da camada carbonizada na face inferior, em milímetros;

TC_l é a taxa média de carbonização nas faces laterais da viga, em mm/min;

TC_h é a taxa de carbonização na face inferior da viga, em mm/min;

Os autores concluíram baseados nos ensaios que a espessura média da camada carbonizada e a taxa de carbonização são maiores na face inferior da viga do que nas laterais. A taxa de carbonização diminui com o aumento da densidade, apresentando a seguinte ordem decrescente: Taiwania > Japanese cedar > China fir > Douglas fir > Southern pine.

Em Zhaopeng e Peinfang (2012) realizou-se uma série de ensaios para avaliar modos de falha e resistência ao fogo de vigas de MLC com diferentes dimensões de seções transversais. Os ensaios foram realizados em um forno horizontal com exposição ao fogo em três faces, sendo o vão igual a 5400 mm, sendo as extremidades isoladas com mantas de fibra cerâmicas (Figura 2.9). O aquecimento do forno foi realizado de acordo com as diretrizes da norma chinesa GB/T 9978:2008 (equivalente a ISO 834). As temperaturas do interior do forno foram registradas por meio de 12 termopares.

O critério de parada adotado para o ensaio foi o deslocamento máximo da viga estipulado a partir de $L/20$, sendo L o vão livre do elemento em milímetros. Depois de encerrado o ensaio o elemento foi removido e resfriado para avaliação da seção

transversal residual. Os autores concluíram que vigas de MLC com seções transversais maiores tem um melhor desempenho ao fogo, entretanto uma resistência ao fogo mais alta não é alcançada aumentando apenas a altura da viga, ou seja, a largura e altura da seção devem ser aumentadas em conformidade para atender o tempo requerido de resistência ao fogo.



Figura 2.9: Preparação do ensaio com posicionamento da viga. Fonte: Zhaopeng e Peifang (2012)

Em Lange et al. (2014) foi avaliada o desempenho estrutural e a taxa de carbonização sob três tipos diferentes de curvas de exposição ao fogo. No total avaliaram 32 vigas de Madeira Laminada Colada em situação de incêndio, sendo realizados quatro testes no forno horizontal, e em cada teste oito vigas foram avaliadas simultaneamente com exposição ao fogo em três faces, como ilustrado na Figura 2.10.

A face superior das vigas foi isolada com blocos de concreto leve com dimensões de 150 x 200 x 580 mm, exceto nas regiões de aplicação de carregamento, onde um bloco de madeira foi posicionado e usado para transferir a carga aplicada por um atuador hidráulico. Os blocos de concreto leve foram isolados com lã mineral no lado exposto ao fogo. A interação entre os blocos nas vigas foi reduzida colocando um material isolante leve de espessura igual a cinco milímetros entre os blocos. A interação entre os blocos de diferentes vigas foi reduzida adicionando uma placa mais rígida de isolante térmico e uma camada de material isolante mais flexível entre os blocos.

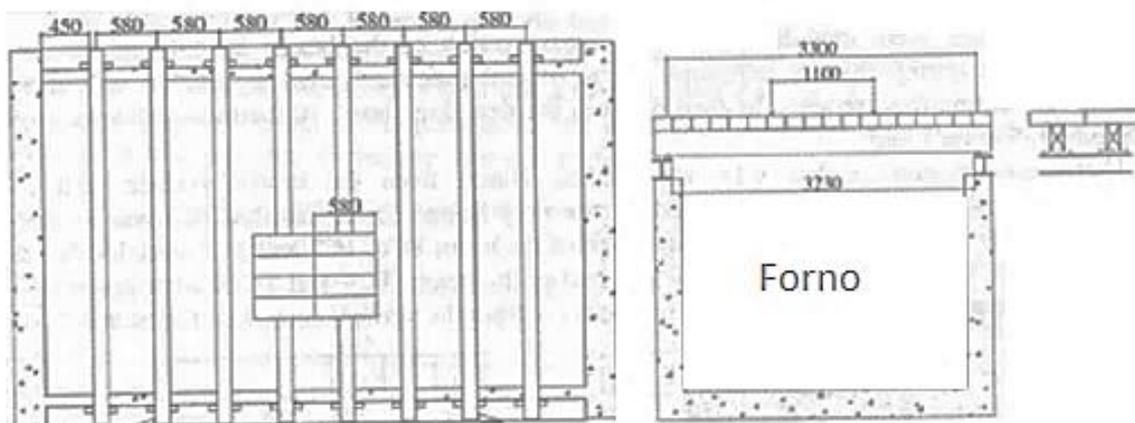


Figura 2.10: Layout do arranjo experimental (dimensões em milímetros). Fonte: Lange et al. (2014)

O vão livre dos elementos era 3300 mm e a seção transversal com largura 170 mm e altura igual a 270 mm. Em dois testes realizados, houve torção de alguns elementos, e portanto se fez necessário realizar um travamento. Os autores consideraram que esse arranjo não influenciou significativamente no comportamento individual das vigas submetidas à flexão, Figura 2.11.

As temperaturas no interior do forno foram registradas por meio de 20 termopares de placas distribuídos no interior do forno, Figura 2.12.a. A distribuição de temperatura no interior dos elementos foi realizada por 10 termopares do tipo K posicionados no interior da seção transversal das vigas. A Figura 2.12.b apresenta a instrumentação necessária para posicionamento dos termopares tipo K no interior dos elementos.



Figura 2.11: Posicionamentos dos elementos e isolamentos . Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 2.12: Termopares: (a) interior do forno; (b) equipamentos para instalação no interior da seção.

Os termopares tipo K instalados no interior da seção transversal foram posicionados a 10 mm a partir da superfície aquecida, e os demais termopares em intervalos de 10 mm dessa mesma superfície. Então, o termopar TC5 foi posicionado a 50 mm da face inferior da viga, como ilustrado na Figura 2.13.

Os elementos foram submetidos à aplicação de carregamento até ocorrer o colapso das vigas, e imediatamente após a ruptura da última viga a estrutura de apoio foi removida. Todos os cabos de termopares e outros dispositivos de medição foram desconectados dos sistemas de aquisição. A estrutura de carregamento e apoio dos elementos foi retirada do forno e apoiada em quatro estruturas de suporte e, então as chamas residuais das vigas foram extintas com o uso de jato de água. O procedimento levou aproximadamente 6 minutos em todos os casos.

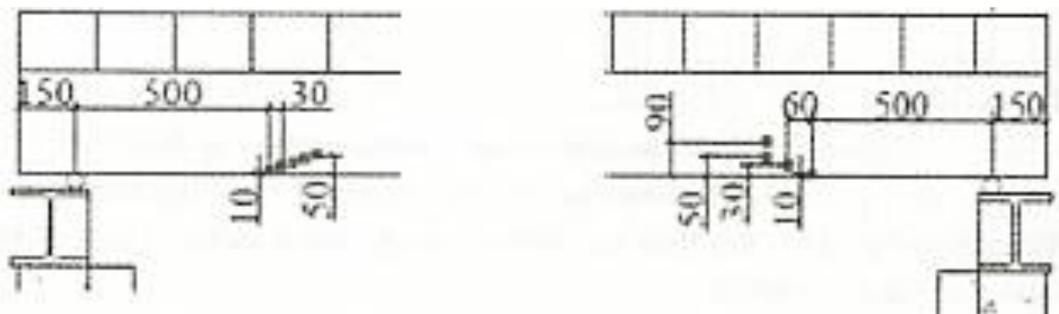


Figura 2.13: Ilustração do posicionamento dos termopares (medidas em mm). Fonte: Lange et al. (2014)

A Figura 2.14 (a) apresenta a distribuição da temperatura média para o ensaio com aquecimento de acordo com a curva de incêndio-padrão ISO 834, sendo as curvas correspondentes à temperatura média registrada na face inferior até a extremidade na face lateral da viga. Na Figura 2.14 (b) observa-se a fase de resfriamento, onde a temperatura máxima próxima à superfície aquecida acontece em torno de 20 minutos.

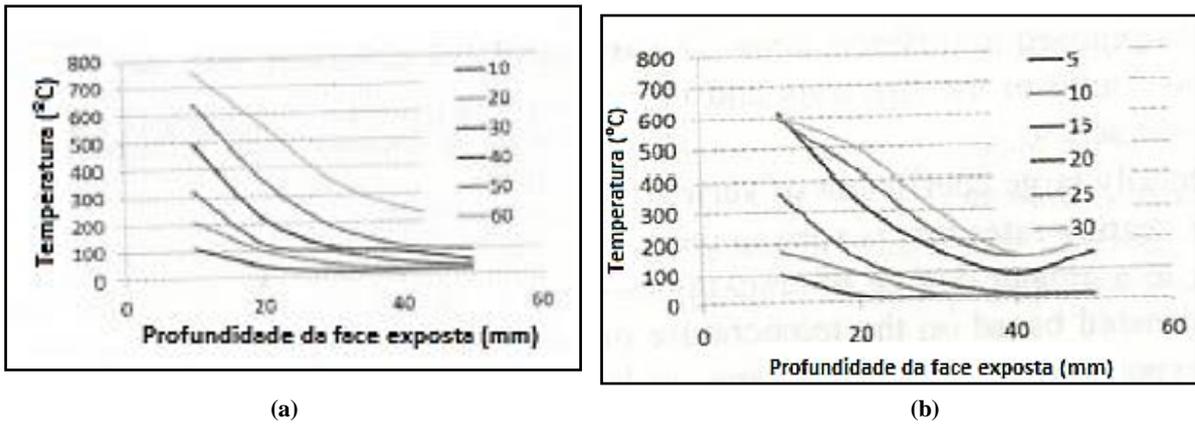


Figura 2.14: Distribuição de temperatura: (a) curva de incêndio-padrão; (b) curva paramétrica com uma fase curta de aquecimento. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014)

Observa-se na Figura 2.15 que a temperatura continua aumentando próxima a superfície de aquecimento do elemento, isso ocorre de acordo com os autores, devido à taxa mais lenta de diminuição de temperatura com o tempo na fase de resfriamento.

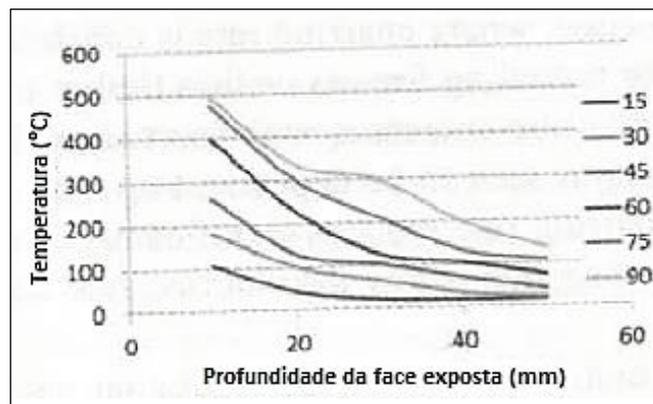


Figura 2.15: Distribuição de temperatura: curva paramétrica com uma fase longa de resfriamento. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014)

Lange et al (2014) determinaram a taxa de carbonização unidimensional, por meio da Equação 2.5 considerando o tempo necessário para os termopares posicionados no interior da seção registrassem temperaturas próximas a 270°C, sendo adotada com a isotérmica de início de carbonização.

$$\beta_{1d} = \frac{d_{tc}}{t_{char}} \tag{Equação 2.5}$$

Onde,

β_{1d} é a taxa de carbonização unidimensional em mm/min;

d_{tc} a profundidade do termopar mais próximo da superfície;

t_{char} é o tempo em minutos que o termopar levou para alcançar a temperatura de carbonização desde o início do ensaio.

A Equação 2.5 fornece valores médios de taxa de carbonização sobre a distância estipulada, ao contrário da taxa de carbonização “real”. As taxas de carbonização estimada usando o método em diferentes profundidades para as diferentes curvas de exposição são apresentadas na Figura 2.16. A barra de erros representa o desvio padrão. Observa-se que a taxa de carbonização para os testes seguindo a curva de incêndio-padrão aumenta de aproximadamente 0,4 mm/min no início para 0,7 mm/min ao final do ensaio.

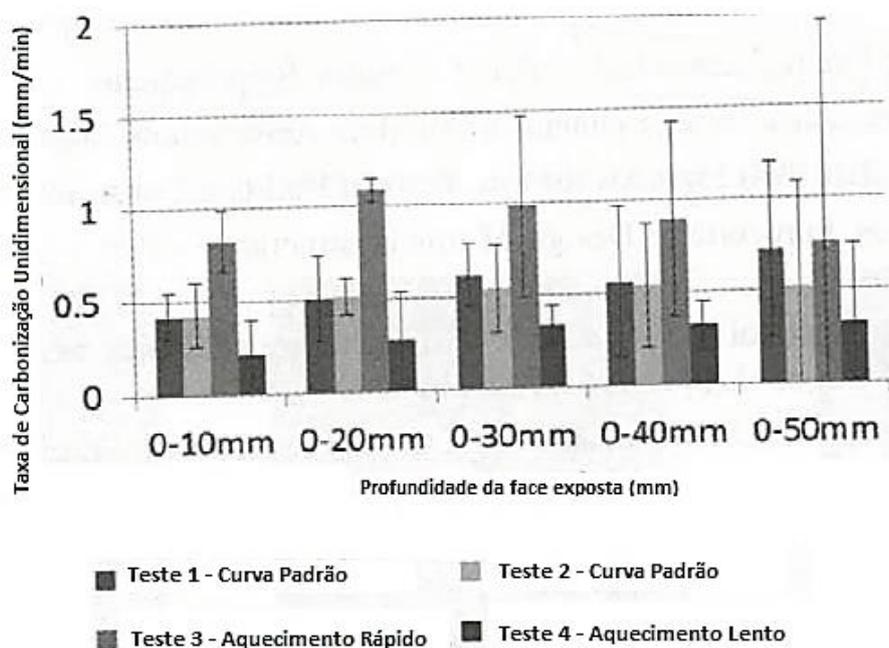


Figura 2.16: Taxa de carbonização dos elementos. Fonte: Adaptado de Lange et al. (2014)

Os autores observaram que em curvas de exposição ao fogo com temperaturas mais altas ou taxas de carbonização mais severas, o coeficiente de variação aumenta com o aumento do tempo de exposição e profundidade, e atribuíram esse fato ao maior número de fissuras na camada carbonizada em uma curva de exposição ao fogo mais agressiva. Em testes utilizando a curva paramétrica de exposição ao fogo a taxa de carbonização é dependente da taxa de aquecimento e da taxa de resfriamento.

Com base nos resultados concluíram também que a curva com aquecimento curto tem uma redução da taxa de carbonização significativa durante a fase de resfriamento, enquanto que nos elementos com curva de exposição com resfriamento longo, nas quais a taxa de resfriamento é baixa, a taxa de carbonização remanescente é relativamente constante.

2.2.4. Comportamento dos adesivos em Situação de Incêndio

A segurança de estruturas de Madeira Laminada Colada é assegurada pela compreensão do controle de qualidade dos produtos e adesivos. As principais normas internacionais que apresentam diretrizes para o desempenho de adesivos usados para a fabricação de elementos estruturais são EN 301: 2013, EN 15425: 2008, EN 16254, ASTM D 4688:2014, ASTM D2559: 2012, dependendo do tipo de adesivo.

O comportamento dos adesivos é essencial para garantir a segurança dos elementos estruturais de madeira. A resistência e durabilidade devem ser mantidas para que elementos de MLC permaneçam com a funcionalidade adequada durante toda a vida útil. Com o aumento da temperatura, a resistência dos adesivos diminui, sendo assim, a funcionalidade dos adesivos em temperaturas elevadas deve ser assegurada para um tempo específico de exposição ao fogo.

Não há diretrizes normatizadas para métodos de avaliação de adesivos utilizados em elementos estruturais submetidos à flexão em exposição em temperaturas elevadas. Entretanto, o comportamento dos adesivos utilizados em elementos estruturais de MLC tem sido analisado por vários pesquisadores.

A seguir serão apresentados os procedimentos para a análise e as discussões de alguns projetos de pesquisa desenvolvidos por pesquisadores de diferentes instituições e nacionalidades, e conseqüentemente, a avaliação de diferentes combinações de espécies de madeira e adesivos.

No trabalho desenvolvido por Kallander e Lind (2001) foram estudadas as propriedades de resistência dos adesivos após a exposição ao fogo. Foram produzidas vigas com seis tipos diferentes de adesivos e registradas a distribuição de temperatura no interior do elemento, perda de peso e a taxa de carbonização. Foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento e testes de delaminação com peças expostas ao fogo e em peças sem exposição para um estudo comparativo das propriedades da linha de cola. Os adesivos testados foram PVA (classe D3 e D4, adesivos sem função estrutural), Poliuretano (com 30 minutos de cura e 3 horas de cura), Polímero Isocianato (EPI) e Ureia formaldeído (UF). As lamelas foram armazenadas em temperatura constante de 20°C até alcançar a umidade de 12%, e com densidade média de 455 kg/m³. Cada viga foi composta de seis lamelas, sendo as dimensões de cada lamela de 150 mm x 40 mm x 1400 mm, e conseqüentemente, as dimensões finais das amostras foram 140 mm x 240 mm x 1100 mm. As lamelas foram selecionadas para alcançar um

mínimo de 200 mm de zona livre de nós no centro da área exposta ao fogo. Cinco termopares do tipo K foram instalados nas vigas em diferentes profundidades, como ilustrado no croqui da Figura 2.17.

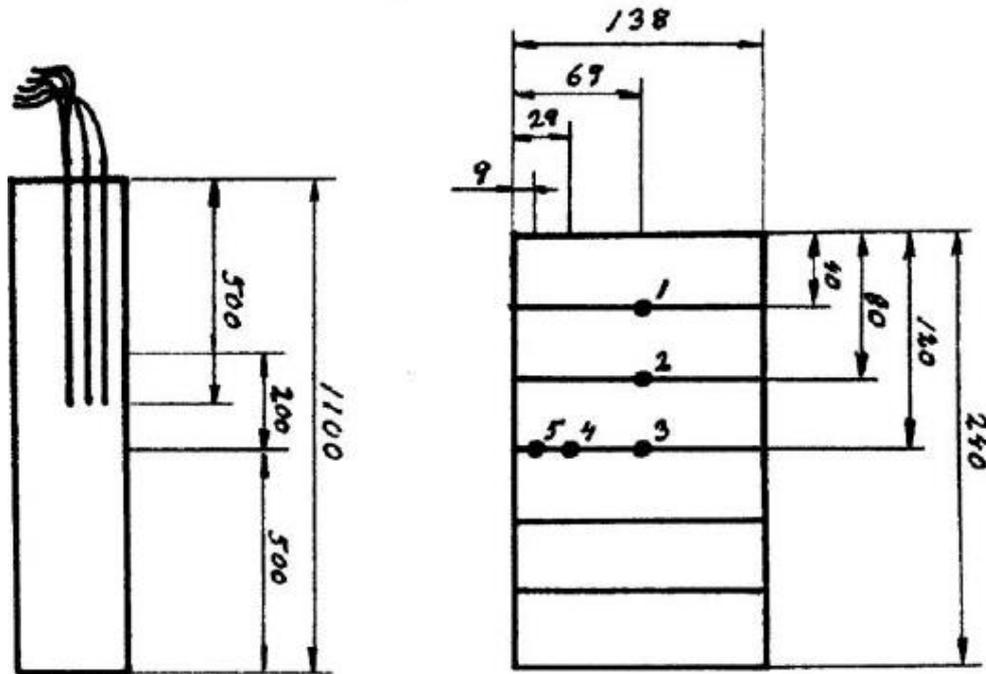


Figura 2.17: Layout do posicionamento dos termopares nas amostras de MLC. Fonte: Kallander e Lind (2001)

Conforme mostrado na Figura 2.18.a, seis amostras foram analisadas simultaneamente no interior de um forno, com volume de um metro cúbico, durante 45 minutos. A curva de aquecimento do forno seguiu as diretrizes para curva de incêndio-padrão estabelecida pela ISO 834.

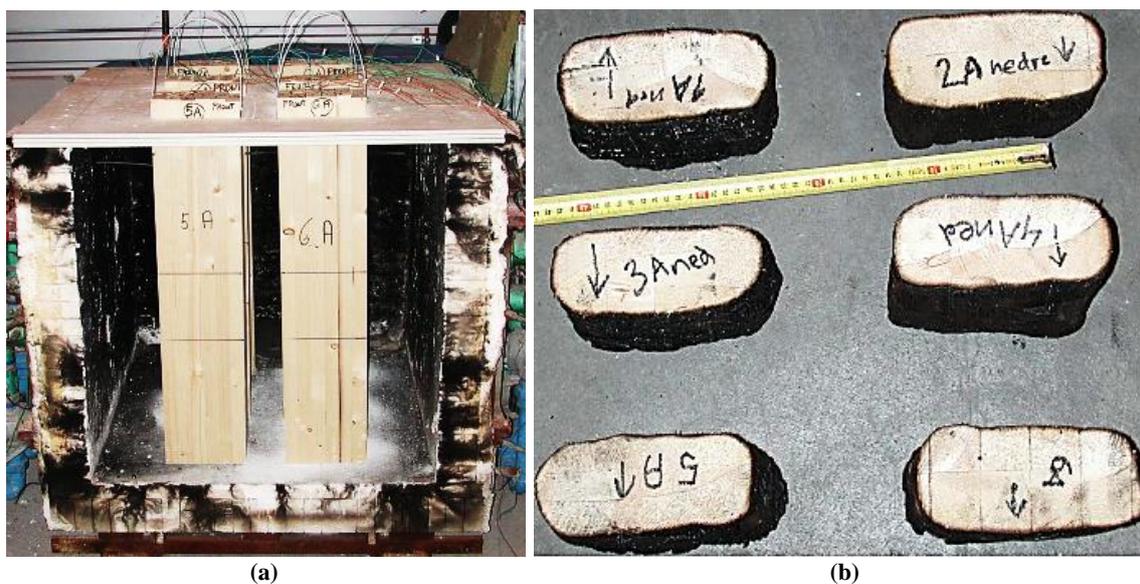


Figura 2.18: Amostras de MLC: (a) posicionamento no interior do forno; (b) amostras para avaliação da seção transversal residual. Fonte: Kallander e Lind (2001)

Depois de encerrado o tempo estipulado para aquecimento, o forno foi desligado e as amostras foram removidas do interior do equipamento e as chamas remanescentes foram extintas com jato de água. Em seguida, as vigas foram pesadas e extraídas amostras retiradas de aproximadamente 30 cm em relação a parte inferior e superior, como mostrado na Figura 2.18.b. Determina-se então a seção transversal remanescente da madeira, a taxa de carbonização e as aberturas nas linhas de cola.

As aberturas na linha de cola foram determinadas pela medida da profundidade das fissuras e a avaliação da resistência cisalhante após a exposição ao fogo foi realizada de acordo com as diretrizes da ASTM D905-08: 2013. Como conclusão dos ensaios os autores observaram que a taxa de carbonização não variou significativamente entre as vigas com diferentes tipos de adesivos e a perda de densidade relativa das vigas durante a exposição ao fogo variou entre 57% e 66%.

A abertura de fissuras nas linhas de colas para os adesivos de PVA foram significativamente mais profundas do que as aberturas em outros adesivos. Todos os adesivos mostraram uma redução na resistência cisalhante média após a exposição ao fogo comparada com a resistência obtida à temperatura ambiente, sendo que a resistência cisalhante média foi menor quanto mais próxima da superfície do que no interior da viga.

Sobre a distribuição de temperatura no interior das vigas, os autores observaram que no centro da seção a temperatura permaneceu baixa durante todo o ensaio, sendo que ao final do teste a temperatura no centro estava entre 37 °C e 50 °C.

Em relação à taxa de carbonização, o fato de não ter sido observado diferenças entre as taxas de carbonização nas vigas com diferentes tipos de adesivos, inclusive entre o adesivo termoplástico PVA (sem função estrutural), indica que o tipo de adesivo tem pouca ou nenhuma influência na taxa de carbonização das vigas. Deve se ressaltar o fato de que o estudo não foi designado para determinar taxa de carbonização de vigas, sendo que as pequenas dimensões do forno podem influenciar na taxa de carbonização devido ao pouco oxigênio contido no ambiente. Entretanto, desde que as taxas de carbonização encontradas foram próximas ou inferiores a estudos anteriores, isso pode não ter afetado o estudo comparativo entre os adesivos.

Frangi, Fontana e Mischler (2004) realizaram uma série de ensaios para estudar o comportamento de diferentes tipos de adesivos em temperaturas elevadas. As dimensões das amostras de MLC foram 112 x 40 x 40 mm³, com densidade entre 456 e 533 kg/m³. Sete tipos de adesivos foram avaliados, sendo eles: à base de Resorcina

formaldeído (Kauresin 460), à base de poliuretano monocomponente (Kauranat 970, Balcotan 107 TR, Balcotan 60 190, Purbond HB 110, Purbond VN 1033) e à base de epóxi (Araldite AW 136H).

O comportamento cisalhante foi analisado experimentalmente com o arranjo apresentado na Figura 2.19.a. Os corpos de prova foram aquecidos em um forno até alcançar a temperatura constante requerida, e então rapidamente transferidos para a máquina de ensaios para aplicação do carregamento. Para a temperatura ser mantida constante utilizou-se um aquecedor de ar industrial e revestimento com isolamento de lâ mineral, como mostrado na Figura 2.19.b. A temperatura foi registrada durante o aquecimento e ao longo do processo de aplicação de carga.

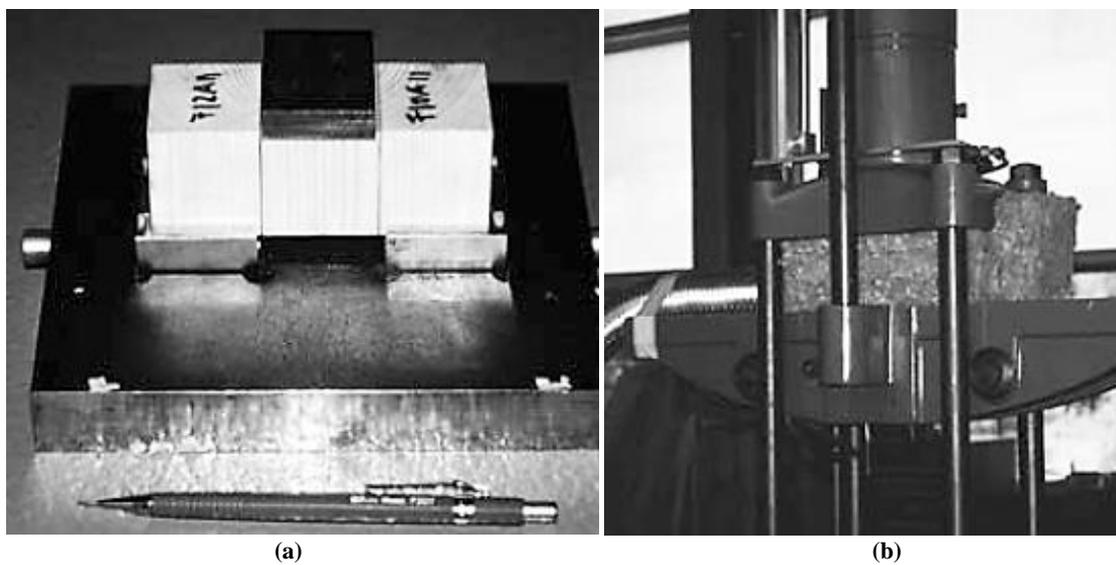


Figura 2.19: Ensaio: (a) preparação do CP (b) Carregamento. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004)

A faixa de temperatura analisada alternou entre 20° a 170° C, sendo observados três modos de falha, mostrados na Figura 2.20: falha na madeira fora da linha de cola, falha entre o adesivo e a madeira, e por último, falha na linha de cola por perda da coesão do adesivo.

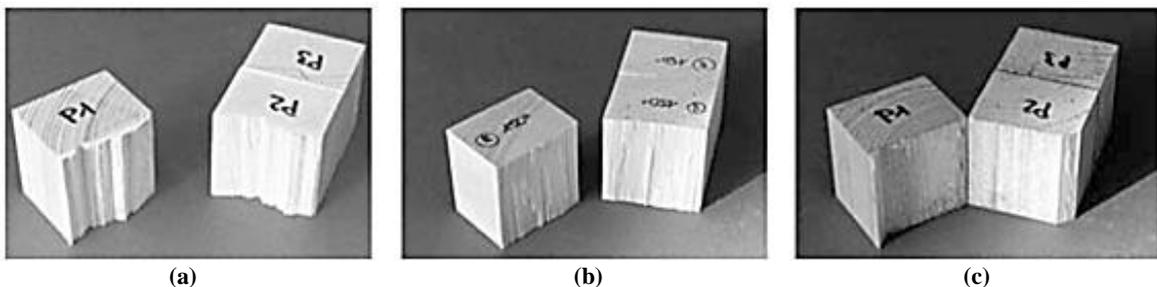


Figura 2.20: Modos de falha: (a) falha na madeira fora da linha de cola, (b) falha do adesivo, (c) falha de coesão do adesivo. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as faixas de temperatura em que ocorreram falhas entre o adesivo e a madeira devido à perda de coesão.

Tabela 2.1: Faixas de temperatura em que ocorreram falhas. Fonte: Frangi, Fontana e Mischler (2004).

Resorcinol Formaldeído	Poliuretano monocomponente					Epóxi
Kauresin 460	Kauranat 970	Balcotan 107 TR	Balcotan 60 190	Purbond HB 110	Purbond VN 1033	Araldite AW 136 H
>170 °C	180-190°C	50-60°C	190-200°C	60-70°C	150-160°C	50-60°C

Como pode ser observado na Tabela 2.1, para os adesivos Balcotan 107TR e Purbond HB110 a falha devido à perda de coesão ocorreu em temperaturas em torno de 60°C. Entretanto, para os outros tipos de adesivos à base de poliuretano mono componentes a falha ocorreu em temperaturas superiores a 150 °C. Em geral, os resultados apresentaram uma queda de 60% da resistência cisalhante com relação àquela obtida à temperatura ambiente em temperaturas superiores a 70 °C.

O comportamento de adesivos à base de poliuretano em temperaturas elevadas depende da composição de cada tipo de adesivo. Sendo assim o comportamento é diferente para cada tipo de adesivo à base de poliuretano.

Klippel, Frangi e Fontana (2011) realizaram uma série de ensaios de tração em corpos de provas com dimensões de 800 x 140 x 40 mm com finger joint pré-aquecidos em forno, considerando temperaturas estabelecidas em 20, 60,100 e 140 °C. Quatro tipos diferentes de adesivos monocomponente à base de poliuretano, bem como um tipo de adesivo de melanina ureia formaldeído foram estudados. A densidade média das espécies foi igual 435 kg/m³ e a umidade média de 12%. Os ensaios de tração foram realizados com controle de deslocamento e velocidade em torno de 0,02 mm/s usando uma máquina universal de ensaios, Figura 2.21.a. Além da análise experimental, também foi analisado um modelo numérico bidimensional no pacote computacional ABAQUS para análise térmica e análise estrutural foi realizada com o software CSTFire.

A análise numérica foi realizada com a finalidade de se observar a influência do adesivo na resistência de elementos de MLC expostos ao fogo em três faces seguindo a curva de incêndio-padrão proposta pelo ISO 834. As dimensões dos elementos utilizados no modelo numérico foram 225 x 95 mm, Figura 2.21.b, teor de umidade de 12% e as temperaturas foram registradas em diferentes profundidades de 6, 18, 30, 42 e 54 mm.

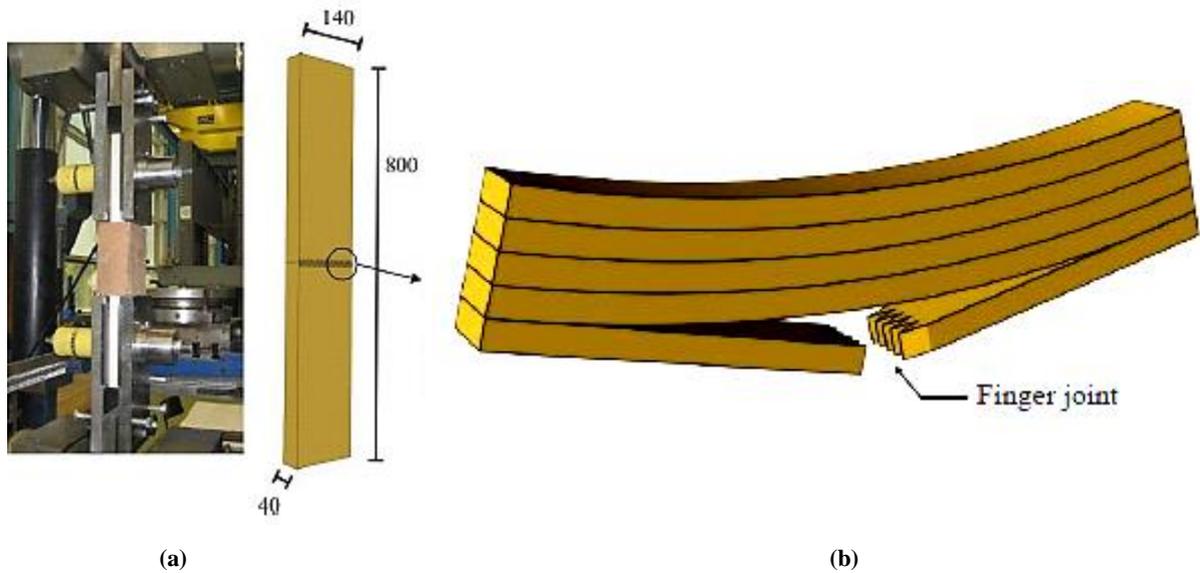


Figura 2.21: Ensaio de Tração: (a) Posicionamento no equipamento; (b) Layout do modelo numérico. Fonte: Klippel, Frangi, Fontana (2011)

Os resultados dos ensaios de tração em corpos de prova com emendas em finger joints mostraram que o comportamento dos adesivos em temperaturas elevadas utilizados em linhas de cola teve pequena influência na resistência de vigas de MLC, de modo que embora o adesivo na linha de cola tenha baixa estabilidade térmica, era esperado que a resistência ao fogo fosse governada pela resistência à flexão e não pela resistência cisalhante. Por outro lado, os resultados do modelo numérico indicaram que o comportamento do adesivo influenciou significativamente o desempenho ao fogo do finger joint. Os autores ao final do trabalho não conseguiram encontrar uma comparação satisfatória entre a análise numérica e experimental, com base nos dados estudados.

Degiovani, Segundinho e Calil Junior (2011) analisaram o desempenho da linha de cola em diversas combinações entre madeira e adesivo em temperaturas elevadas. Os corpos de prova foram compostos por três lamelas, como mostrado na Figura 2.22.a, e preparados com madeiras da espécie Teca (*Tectona grandis L.f*), *Pinus Oocarpa* e *Eucalyptus* (Lyptus). Os corpos de prova de MLC preparados com madeiras de Teca e Lyptus utilizaram adesivo à base de Resorcina Fenol Formaldeído e os corpos de prova de *Pinus Oocarpa* foram fabricados com três tipos de adesivos (Resorcina Fenol Formaldeído (RFF), Poliuretano (PUR) e Melanina-uréia-formaldeído (MUF)).

Os corpos de prova foram aquecidos em um forno vertical, Figura 2.22.b, em temperaturas pré-estabelecidas (21,5°C, 40°C, 80°C, 120°C, 160°C, 200°C). Em seguida foram transferidos para uma máquina de ensaios e submetidos ao carregamento para determinação da resistência ao cisalhamento na linha de cola.



Figura 2.22: (a) Corpo de Prova; (b) Forno vertical. Fonte: Degiovani, Segundinho, Calil Jr. (2011)

Os autores observaram que a capacidade de resistência da linha de cola ao cisalhamento em temperaturas de 200 °C equivale , no máximo, 50% da resistência determinada em temperatura ambiente. Em outras palavras, a perda de resistência ao cisalhamento com aumento de temperatura foi significativa. Notou-se ainda que, independente da espécie da madeira ou adesivo a perda de resistência foi semelhante. O modo de falha predominante foi devido à perda de coesão entre o adesivo e a madeira. Na avaliação dos adesivos em temperaturas acima de 200 °C utilizados nos corpos de prova da espécie de madeira Pinus, os resultados para a resistência ao cisalhamento foram menores quando utilizados o adesivo à base de Poliuretano, bem como maiores para os adesivos à base Resorcina Fenol Formaldeído, RFF > MUF > PUR.

Em Harada et al. (2012) foram realizados ensaios com vigas de MLC produzidas com três tipos de adesivos Resorcina Formaldeído (RF), Emulsão de Polímero isocianato (EPI), e Resina de Polivinil acetato (PVAc). O elemento estudado foi produzido com madeira da espécie Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) com dimensões de 150 mm (largura) x 350 mm (altura) x 5500 mm (comprimento), sendo 23 lamelas com espessura 13,4 mm, como ilustrado na Figura 2.23.a. As densidades dos elementos⁴ apresentaram variação de acordo com o adesivo aplicado, sendo: 380 kg/m³ quando utilizado o adesivo a base resorcina formaldeído, 370 kg/m³ para EPI e 360 kg/m³ para PVAc. Para comparar a resistência ao fogo dos elementos foram conduzidos ensaios em

⁴ Informações obtidas via email com um dos autores do artigo em 13 de maio de 2014.

um forno horizontal com exposição ao fogo durante 45 minutos, seguindo a curva de incêndio padrão proposta pela ISO 834-1: 1999. A Figura 2.23.b apresenta uma visualização do interior do forno durante o aquecimento dos elementos.

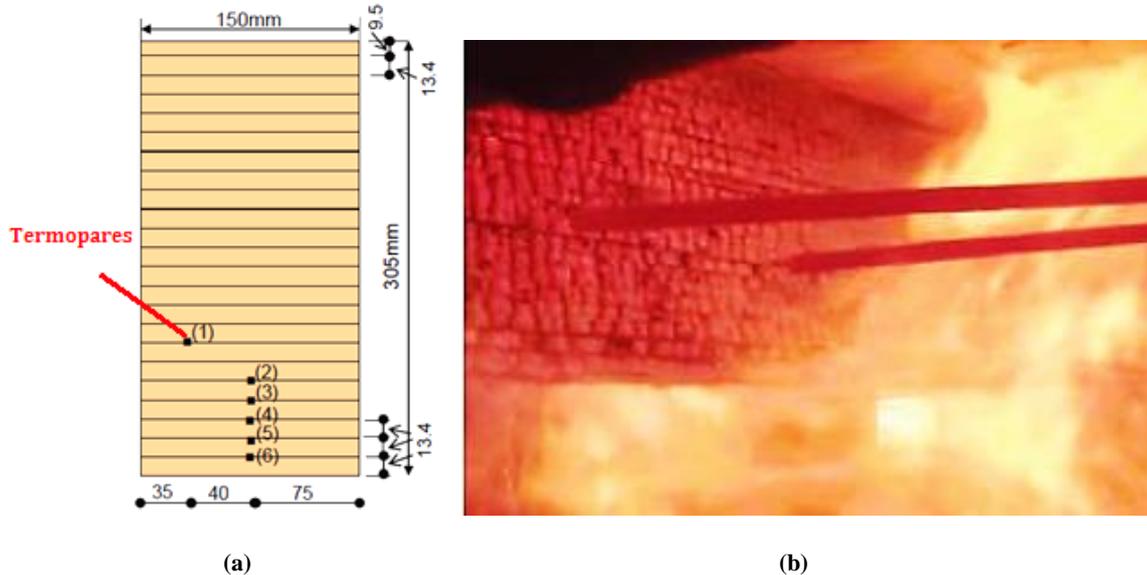


Figura 2.23: Elementos Expostos ao fogo: (a) layout da distribuição dos termopares; (b) carbonização da madeira. Fonte: adaptado de Harada et al. (2012)

Durante o aquecimento no interior do forno foi aplicada uma carga constante igual a 22,87 kN distribuída em dois pontos (ensaio a flexão a quatro pontos). O deslocamento no meio do vão e as temperaturas no interior da seção transversal foram registrados pelo sistema de aquisição de dados.

Foram realizados ensaios de resistência para avaliação do adesivo utilizando corpos de prova preparados com madeira da espécie Birch (*Betula maximowicziana*), com dimensões apresentadas no layout disponível na Figura 2.24.a. O ensaio de resistência ao cisalhamento de adesivos em madeira laminada colada em temperaturas elevadas (21°C, 100°C, 150°C, 200°C) foi realizado de acordo com as diretrizes da ASTM D 7247-06: 2007. O equipamento utilizado para a realização da aplicação de força é mostrado na Figura 2.24.b.

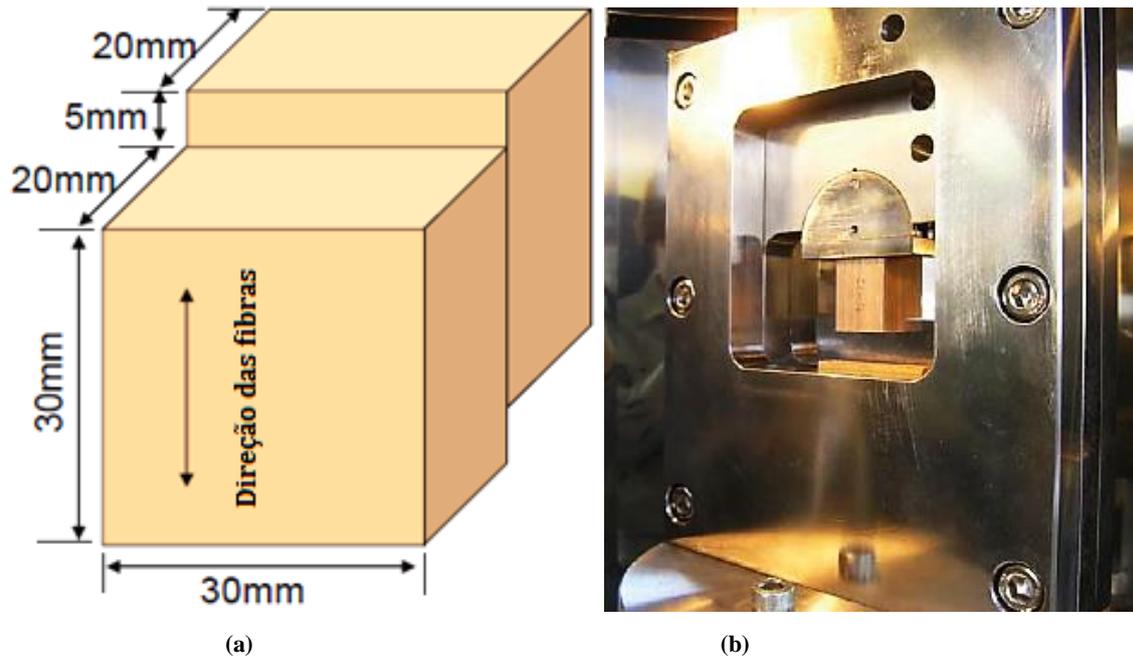


Figura 2.24: Ensaio de resistência: (a) Layout do CP; (b) Máquina de Ensaio. Fonte: Harada et al. (2012)

Para complementar a pesquisa, Harada et al. (2012) analisou as propriedades mecânicas dinâmicas dos adesivos (módulo de perda (E'') e módulo de armazenamento (E') e $\tan \delta = E''/E'$) avaliado por meio do Rheo-vibron DDV -01GP (A & D, Co., Ltd).

Os resultados mostraram que a resistência ao fogo para vigas de MLC utilizando adesivos à base de RF e EPI tiveram desempenhos semelhantes e foram maiores do que os valores obtidos para o adesivo PVA. A espessura de carbonização em vigas com adesivos PVA na direção vertical excedeu 35 mm e o desempenho em relação ao fogo foi inferior a 45 minutos. A resistência da ligação em temperaturas entre 100 °C e 150 °C foi maior para o adesivo à base de RF e menor para o PVAc.

A Figura 2.25 mostra as seções transversais residuais obtidas após a exposição ao fogo de acordo com o tipo de adesivo aplicado entre as lamelas (linha de cola). Em particular, a resistência cisalhante do adesivo PVAc diminuiu drasticamente acima de 150 °C, comportamento que pode ser explicado pelas propriedades mecânicas dinâmicas das resinas. Os autores concluíram que a resistência ao fogo em vigas de MLC depende da resistência cisalhante dos adesivos utilizados.

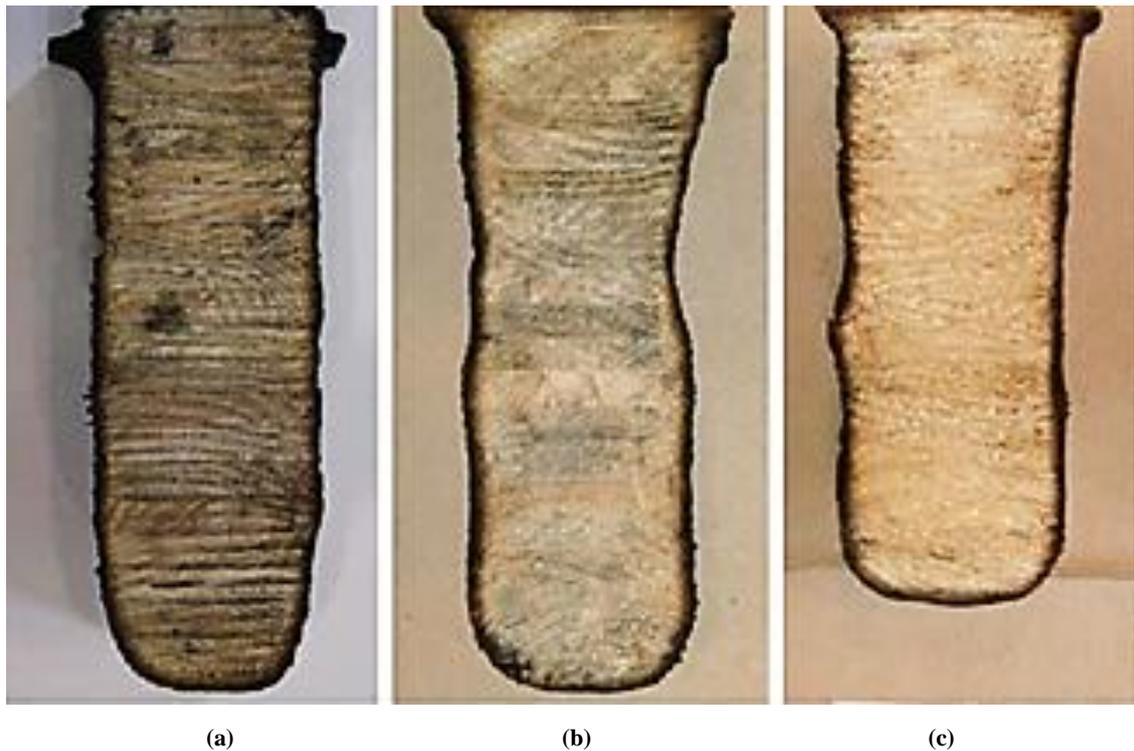


Figura 2.25: Seção transversal residual com diferentes tipos de adesivos. (a) RF; (b) EPI; (c) PVAc Fonte: Harada et al. (2012)

Em Klippel, Frangi e Fontana (2012) foi realizada uma série extensa de ensaios de tração com elementos de madeira com emenda de finger joints em exposição ao fogo seguindo a curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834:1999. Este trabalho complementa as pesquisas realizadas pelos mesmos autores em 2011 e já citadas anteriormente.

Os ensaios foram realizados em um forno horizontal pequeno com dimensões de 1,0 x 0,8 m, em que uma estrutura especial foi desenvolvida para aplicar um carregamento de tração, como pode ser observado na Figura 2.26.

O elemento projetado para o ensaio em temperatura elevada descreve o comportamento real do finger joint em situação de incêndio relevante para vigas de Madeira Laminada Colada. As lamelas foram condicionadas em um ambiente climatizado com umidade a 12 % e a densidade média das espécies de madeira foi em torno de 447 kg/m³.

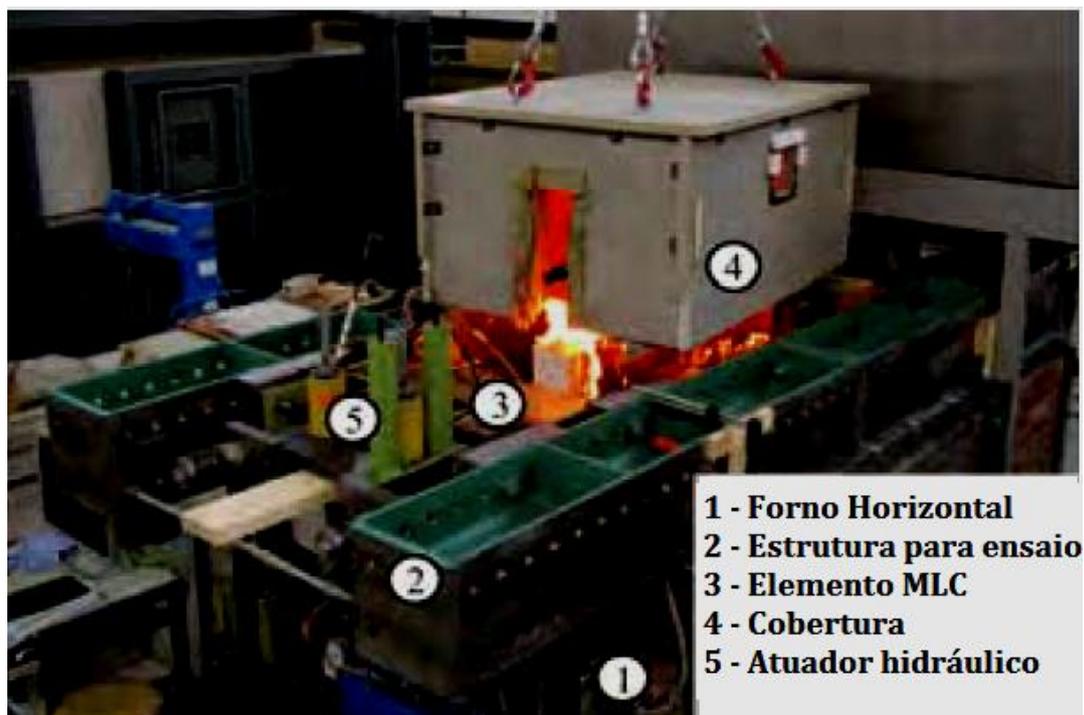


Figura 2.26: Forno horizontal para ensaios. Fonte: Adaptação Klippel, Frangi e Fontana (2012)

Os elementos consistiam em uma placa com finger joint no centro e lamelas adicionais coladas na parte superior e inferior dessa placa, como ilustrado na Figura 2.27, com a finalidade de proteger a lamela com finger joint que está sendo avaliada. A exposição ao fogo foi unidimensional a partir das laterais, o que torna os resultados mais confiáveis.

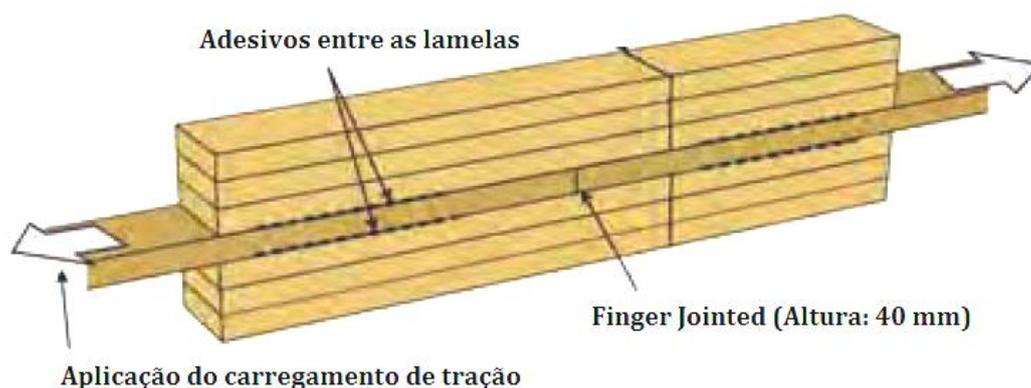


Figura 2.27: Layout do elemento analisado. Fonte: Adaptação Klippel, Frangi e Fontana (2012)

O carregamento foi aplicado na lamela com a emenda em Finger Joint e permaneceu constante durante todo o ensaio. A carga aplicada correspondeu a 30% do valor médio da força máxima (F_u) encontrada em ensaios de tração à temperatura ambiente.

Os autores estudaram a influência de diversos parâmetros, sendo eles a influência do tipo de adesivo (Resorcina fenol formaldeído, Melanina ureia formaldeído, Poliuretanos), a influência da largura, nível de carregamento ($0,2F_u$, $0,3F_u$, $0,45F_u$) e tipo de exposição, levando em conta os padrões de falha, não houve influência significativa entre os tipos de adesivos.

A redução da seção transversal alterando a largura da viga de 140 mm para 80 mm diminuiu consideravelmente a resistência. Para o nível de carga reduzido de $0,2F_u$ a resistência ao fogo aumento aproximadamente 59 min sendo 8 min (16%) a mais do que a média da resistência ao fogo para o nível de carga padrão em torno de $0,3F_u$. Em ensaios com o nível de carga de $0,45F_u$ a falha ocorreu após 35 minutos de exposição ao fogo, o que corresponde a um decréscimo de 16 min (31%) em relação ao nível de carga padrão $0,3F_u$.

O trabalho de doutorado de Klippel (2014) teve como objetivo principal avaliar a influência dos adesivos em elementos estruturais de MLC expostos ao fogo. Com essa finalidade foram estudados doze tipos diferentes de adesivos para aplicações estruturais e não estruturais, sendo oito certificados na Europa para uso estrutural em elementos de madeira e quatro não são certificados para aplicações com finalidade estrutural.

Os adesivos estruturais analisados foram: Emulsão de Polímero Isocianato (EPI), Poliuretano monocomponente, resina de melamina uréia-formaldeído (M1, M2) e resina fenol resorcinol formaldeído (PRF). Os adesivos que foram testados sem certificado para uso estrutural foram os seguintes: resina ureia-formaldeído (UF), resina melamina uréia-formaldeído (M3), poli vinil acetato (PVAc) e poliuretano monocomponente (P7). Os adesivos avaliados envolveram todos os tipos de adesivos disponíveis no mercado europeu e produzidos por diferentes fabricantes.

A etapa de análise experimental em temperaturas elevadas consistiu em ensaios em grande e pequena escala com lamelas de madeira com emendas em finger joint. Os mesmos adesivos foram ensaiados em ambas as séries. O objetivo dos ensaios no forno em grande escala foi identificar experimentalmente a influência dos diferentes parâmetros na capacidade de carregamento à flexão de elementos estruturais de MLC, como os adesivos utilizados no finger joint, a largura da seção transversal, o nível de carregamento e o tipo de exposição (uni ou bidimensional).

Os autores realizaram ensaios em lamelas com finger joint aplicando uma carga de tração constante em exposição ao fogo, seguindo a curva de incêndio-padrão ISO 834:1999, em um forno horizontal com dimensões de 1,0 m x 0,8 m. O ensaio discutido

no trabalho foi apresentado em publicações anteriores do autor, tendo os resultados preliminares apresentados. Sendo assim, a metodologia do ensaio, Figura 2.26, foi discutida por Klippel, Frangi e Fontana (2012). A vantagem na realização deste tipo de ensaio é a distribuição constante da tensão ao longo da altura do elemento.

A espécie de madeira utilizada na análise foi a Norwegian Spruce (*Picea abies*) com classe de resistência C30 e densidade média igual a 450 kg/m^3 . As dimensões da seção transversal dos elementos foram 140 mm de largura e 280 mm de altura. No total, 49 testes em temperaturas elevadas foram realizados, com aplicação de um esforço de tração constante na direção paralela as fibras em torno de 10 N/mm^2 , correspondendo a 30% da capacidade média de flexão (F_u), obtida em testes desenvolvidos em temperatura ambiente.

Na Figura 2.28 é apresentada a variação da porcentagem em relação ao esforço máximo que foi aplicada durante o aquecimento dos elementos. A curva 1 representa o carregamento de 30% da carga de ruptura em temperatura ambiente, e as curvas 2 e 3 correspondem respectivamente a 20% e 45%.

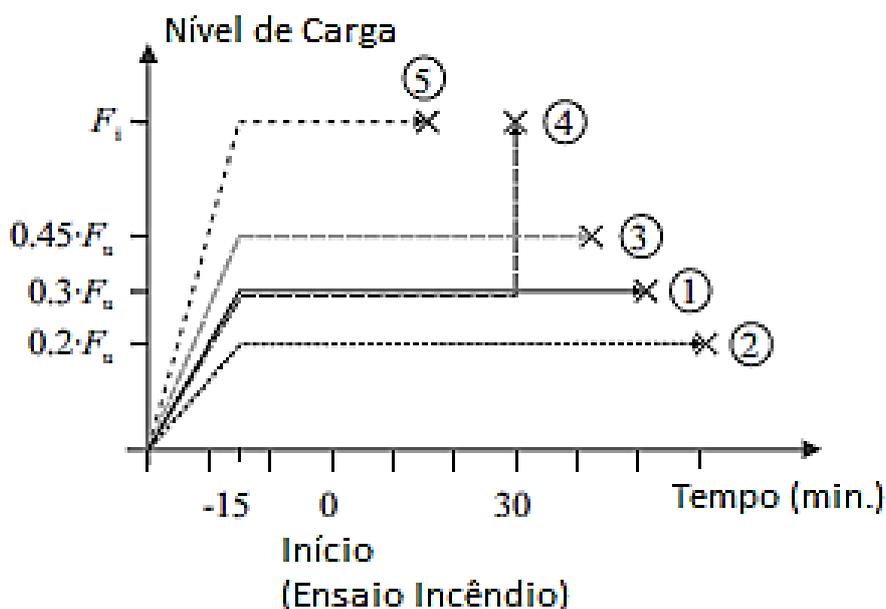


Figura 2.28: Variações da porcentagem de esforço máximo aplicado durante os ensaios. Fonte: Klippel (2014)

Como complemento nas análises, a resistência residual no elemento depois de 30 minutos de exposição e que inicialmente havia sido carregada com 30% da carga de ruptura, foi determinada e apresentada na curva 4. A carga de ruptura determinada no ensaio representado pela curva 4, foi aplicada como uma carga constante em outro teste, representado na curva 5.

A redução do nível de carga de 30% para 20% levou a um aumento na resistência ao fogo de 8,5 minutos, bem como o aumento do nível de carga para 45% resultou em uma diminuição em torno de 15 minutos.

Os autores registraram a carga exata na qual ocorreu a ruptura em cada elemento, a taxa de carbonização unidimensional e o tempo de resistência ao fogo. A resistência ao fogo é definida em Klippel (2014) sendo o tempo de início do ensaio até o colapso da estrutura, isto é, até que a carga aplicada não possa ser mantida constante. Foram observados basicamente quatro tipos de ruptura (Figura 2.29): ao longo da emenda de finger; no finger joint; tipo misto de falha e falha na região sólida da madeira,



Figura 2.29: Tipos de ruptura: (a) falha na emenda ao longo dos fingers; (b) falha no finger joint; (c) falha mista; (d) falha na região fora da emenda. Fonte: Klippel (2014)

Levando em conta os modos de ruptura, os autores não observaram diferença significativa entre os adesivos estruturais estudados, ressaltando que o desempenho dos adesivos nos ensaios em temperaturas elevadas não reflete necessariamente o comportamento ao fogo, desde que defeitos como nós entre outros podem ser mais dominantes, dependendo da classe de resistência.

A resistência ao fogo das lamelas com finger joint coladas com adesivos sem função estrutural, PVAc e PUR (P7), diminuíram em média em torno de 20 minutos em relação a resistência ao fogo de elementos colados com adesivos estruturais. Entretanto, os adesivos UF e MUF, também sem função estrutural, apresentaram resistência ao fogo similar aos elementos preparados com adesivos estruturais. Outro parâmetro que influenciou os resultados em grande escala foi o tipo de exposição ao fogo. Os autores observaram que lamelas protegidas nas faces superior e inferior, expostas ao fogo somente em duas faces, apresentaram uma resistência ao fogo superior entre 10 a 15 minutos em relação às lamelas com exposição ao fogo em três faces.

Dois elementos foram instrumentados com termopares nos dois lados das lamelas nas profundidades de 30, 50, 70 mm. A Figura 2.30 mostra o perfil de temperatura depois de 30 e 60 minutos de exposição ao fogo durante as análises

experimentais e análise de elementos finitos. Devido às propriedades isolantes da madeira, foi observada uma eficiência térmica nas linhas de cola do elemento.

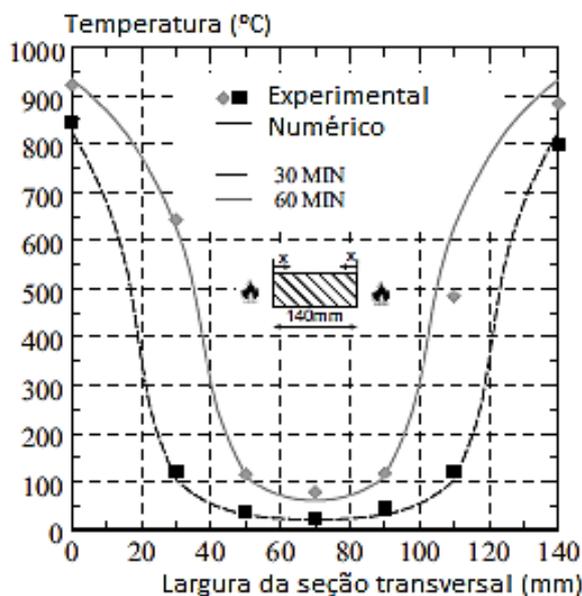


Figura 2.30: Perfil de temperatura depois de 30 e 60 minutos de exposição ao fogo. Adaptado de Klippel (2014)

A segunda etapa da análise experimental desenvolvida no trabalho de Klippel (2014), consistiu em ensaios em pequena escala com corpos de prova de tração com emenda em finger joint, Figura 2.31. No total foram realizados 570 testes com temperaturas entre 20 e 220°C, com os doze tipos de adesivos mencionados anteriormente.

A densidade média dos corpos de prova foi igual a 412 kg/m³, sendo esse valor a menor densidade entre as lamelas ligadas com finger joint. Para avaliar a influência da temperatura na resistência, os corpos de prova foram primeiramente pré-aquecidos durante uma hora até a temperatura requerida (20, 90, 110, 140 ou 220°C).

Os ensaios de tração foram realizados usando uma máquina universal de ensaios, instalada em uma câmara climatizada com a temperatura exata requerida. As temperaturas foram registradas por meio de termopares do tipo K instalados em alguns corpos de prova em furos realizados no centro da seção transversal e fixados com resina epóxi.

Os ensaios com os corpos de prova preparados com adesivos PVAc não foram pré-aquecidos com a temperatura de 220 °C, sendo que a queda da resistência do adesivo acontece em temperaturas inferiores à 140 °C.

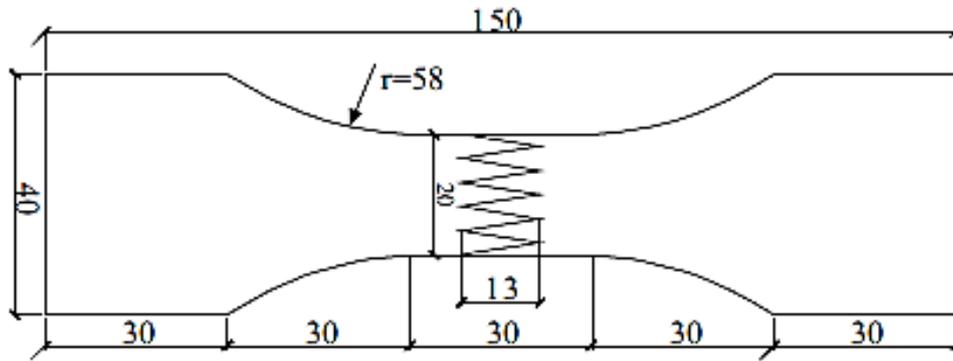


Figura 2.31: Dimensões dos corpos de prova em mm, profundidade de 5 mm. Fonte: Klippel (2014)

Nessa fase os autores observaram três tipos de ruptura nos corpos de prova, mostrado nas imagens da Figura 2.32: ao longo da emenda finger joint; na tração da madeira fora da região do finger joint; e tipo misto de falha (na emenda e fora da região de emenda).

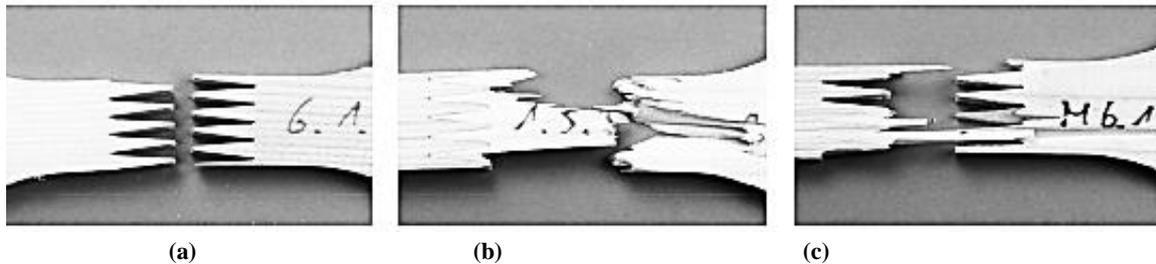


Figura 2.32: Tipos de ruptura: (a) no finger joint; (b) fora da região da emenda; (c) tipo misto de falha. Fonte: Klippel (2014)

Na análise dos resultados de Klippel (2014) na faixa de temperatura entre 20 e 140 °C, os adesivos nas emendas de finger joints apresentaram uma diminuição moderada na resistência à tração com o aumento da temperatura. Com exceção do adesivo PVAc, que apresentou valores baixos para a resistência em temperaturas próximas a 90 °C, devido ao comportamento termoplástico.

Em temperaturas acima de 220 °C, os adesivos à base de melamina e fenol resorcinol formaldeído apresentaram ruptura na madeira. Para o adesivo poliuretano, P3, chegou a uma resistência à tração semelhante aos corpos de prova fabricados com melamina em todas as temperaturas testadas. Para os outros tipos de adesivos à base de poliuretano não ocorreu em temperaturas inferiores a 220°C.

A Tabela 2.2 apresenta um resumo das principais contribuições a partir dos testes realizados para avaliação do comportamento de adesivos em temperaturas elevadas. O que pode se observar que a queda na resistência cisalhante dos adesivos estruturais em temperaturas superiores a 200°C não afetam o comportamento de vigas submetidas a um esforço de flexão.

Tabela 2.2: Principais contribuições a respeito do comportamento de adesivos em temperaturas elevadas. (continua)

Autor (ano)	Madeira / Densidade	Adesivos	Principais conclusões
Kallander e Lind (2001)	455 kg/m ³	PVA (classe D3 e D4, adesivos sem função estrutural), Poliuretano (com 30 minutos de cura e 3 horas de cura), Polímero Isocianato (EPI) Ureia formaldeído (UF)	A abertura de fissuras nas linhas de colas para os adesivos de PVA foram significativamente mais profundas do que as aberturas em outros adesivos. O tipo de adesivo tem pouca ou nenhuma influência na taxa de carbonização das vigas, sendo que a taxa de carbonização não variou significativamente entre as vigas com diferentes tipos de adesivos.
Frangi, Fontana e Mischler (2004)	Entre 456 e 533 kg/m ³	Resorcina formaldeído (Kauresin 460), Poliuretano monocomponente (Kauranat 970, Balcotan 107 TR, Balcotan 60 190, Purbond HB 110, Purbond VN 1033) Epóxi (Araldite AW 136H).	Para os adesivos Balcotan 107TR e Purbond HB110 à falha ocorreu em temperaturas em torno de 70°C, entretanto para os outros tipos de adesivos à base de poliuretano ocorreu em temperaturas superiores a 150°C. O comportamento de adesivos à base de poliuretano em temperaturas elevadas depende da composição de cada tipo de adesivo.
Klippel, Frangi e Fontana (2011)	435 kg/m ³	Quatro tipos de Poliuretano Um tipo de Melanina Ureia formaldeído	O comportamento dos adesivos em temperaturas elevadas utilizados em linhas de cola tem pequena influência na resistência de vigas de MLC. Espera-se que a resistência ao fogo fosse governada pela resistência à flexão e não pela resistência cisalhante.
Degiovani, Segundinho e Calil Junior (2011)	Teca (650 kg/m ³) Pinus (505 kg/m ³) Lyptus (740 kg/m ³)	Resorcina Fenol Formaldeído Poliuretano Melanina-uréia-formaldeído	A capacidade de resistência da linha de cola ao cisalhamento em temperaturas de 200 °C equivale à, no máximo, 50% da resistência determinada em temperatura ambiente.

Tabela 2.2: Principais contribuições a respeito do comportamento de adesivos em temperaturas elevadas. (conclusão)

Autor (ano)	Madeira / Densidade	Adesivos	Principais conclusões
Harada et al. (2012)	Sakhalin fir (<i>Abies sachalinensis</i>): 370 kg/m ³	Resorcina Formaldeído Emulsão de Polímero Isocianato Resina de Polivinil Acetato	Os resultados mostraram que a resistência ao fogo para vigas de MLC utilizando adesivos à base de RF e EPI tiveram desempenhos semelhantes e foram maiores do que utilizando o adesivo PVA. Em particular, a resistência cisalhante do adesivo PVAc diminui drasticamente acima de 150 °C.
Klippel, Frangi e Fontana (2012)	447 kg/m ³ .	Resorcina fenol formaldeído, Melamina ureia formaldeído, Poliuretano.	Levando em conta os padrões de falha, não houve influência significativa entre os tipos de adesivos.
Klippel (2014)	Norwegian Spruce (<i>Picea abies</i>) 450 kg/m ³	<u>Função estrutural:</u> Emulsão de Polímero Isocianato Poliuretano monocomponente (P2, P3, P4, P6), Melamina uréia-formaldeído (M1, M2) Fenol Resorcinol Formaldeído (PRF). <u>Sem Função estrutural:</u> Ureia-formaldeído (UF), Melamina Uréia -formaldeído (M3), Poli Vinil Acetato (PVAc) Poliuretano monocomponente (P7).	Levando em conta os modos de ruptura, os autores não observaram diferença significativa entre os adesivos estruturais estudados, ressaltando que o desempenho dos adesivos nos ensaios em temperaturas elevadas não reflete necessariamente o comportamento ao fogo, desde que defeitos como nós ou outros podem ser mais dominantes, dependendo da classe de resistência. A resistência ao fogo das lamelas com finger joint coladas com adesivos sem função estrutural, PVAc e PUR (P7), diminuíram em média em torno de 20 minutos em relação a resistência ao fogo de elementos colados com adesivos estruturais. Entretanto, os adesivos UF e MUF, também sem função estrutural, apresentaram resistência ao fogo similar aos elementos preparados com adesivos estruturais.

Capítulo 3

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1. Informações Gerais

Este capítulo descreve os ensaios realizados durante o desenvolvimento do presente trabalho, cujo programa experimental foi dividido nas seguintes etapas: ensaios à temperatura ambiente e em temperatura elevada.

Os ensaios à temperatura ambiente tiveram como finalidade determinar as propriedades de resistência dos elementos de Madeira Laminada Colada. Por outro lado, nos ensaios em temperaturas elevadas, realizados no forno horizontal a gás, se avaliou a taxa de carbonização das espécies e a resistência ao fogo dos elementos com aplicação de carregamento. Além disso, foram realizados ensaios com o equipamento de Schlyter Modificado, com a finalidade de analisar a propagação de chamas em painéis tratados com produtos retardantes ao fogo.

3.2. Elementos de Estudo

O programa experimental foi desenvolvido com uma espécie de madeira de cada grupo, e provenientes de reflorestamento, no caso, o Lyptus[®], um híbrido de madeiras da espécie *Eucalyptus sp.*, e representante do grupo das Angiospermas (Folhosas) e o *Pinus Oocarpa*, como representante do grupo das Gimnospermas (Coníferas).

Os elementos foram produzidos pela Empresa ITA, uma das principais empresas de MLC no Brasil, cujas etapas de produção dos elementos são acompanhadas por um rigoroso controle de qualidade no processo fabril.

Os elementos foram confeccionados com largura de 150 mm, altura de 420 mm e comprimento igual a 3500 mm. As lamelas de Eucalyptus (Lyptus[®]) foram preparadas com espessura de 30 mm, enquanto as de Pinus com 35 mm de espessura. Com a finalidade de obter a altura estipulada em projeto, os elementos de MLC foram preparados com 14 e 12 lamelas, respectivamente, para Lyptus e Pinus, sendo utilizado adesivo estrutural a base de poliuretano monocomponente, com uma taxa de aplicação de 200 g/m² e pressão de 10 MPa.

Na Figura 3.1 são apresentados os elementos estruturais de MLC preparados pela empresa, os quais foram posteriormente transportados para o Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira – EESC – USP.



Figura 3.1: Lote de elementos estruturais de MLC: (a) Lyptus®; (b) Pinus.

Os elementos foram inicialmente identificados, pesados e medidos para a determinação da densidade aparente das peças. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características do material do lote de elementos estruturais de MLC produzidos com madeira da espécie *Eucalyptus sp.* (Lyptus®).

Tabela 3.1: Características do lote de elementos de MLC de Lyptus®.

CP	Dimensões (mm)			Área (m ²)	Momento de Inércia (m ⁴)	Volume (m ³)	Peso (Kg)	Densidade ρ_{ap} (Kg/m ³)
	Altura	Largura	Comprimento					
L1	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	164,15	744,4
L2	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	164,45	745,8
L3	421	150	3500	0,063	9,33E-04	0,2	164,55	744,5
L4	421	149	3500	0,063	9,27E-04	0,2	150,00	683,2
L5	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	170,50	773,2
L6	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	173,00	784,6
L7	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	158,00	716,6
L8	420	150	3500	0,063	9,26E-04	0,2	165,20	749,2
							Média	743

Para os elementos preparados com madeira da espécie Pinus foram produzidas 4 (quatro) peças adicionais, nas quais foram realizados tratamentos com produtos preservantes por meio de imersão prolongada, realizado na sede da empresa Montana Química S.A.

Os tratamentos utilizados foram OSMOGUARD® FR 100, produto retardantes de chamas altamente efetivo contra a propagação do fogo, sendo avaliado em laboratório por meio do ensaio de Schlyter Modificado e MOQ® OX 50-CCB-O,

preservante hidrossolúvel, de ação fungicida e inseticida, classificado quimicamente como Borato de Cobre Cromatado Óxido, o qual confere à madeira uma coloração verde, como pode ser observado na Figura 3.2.

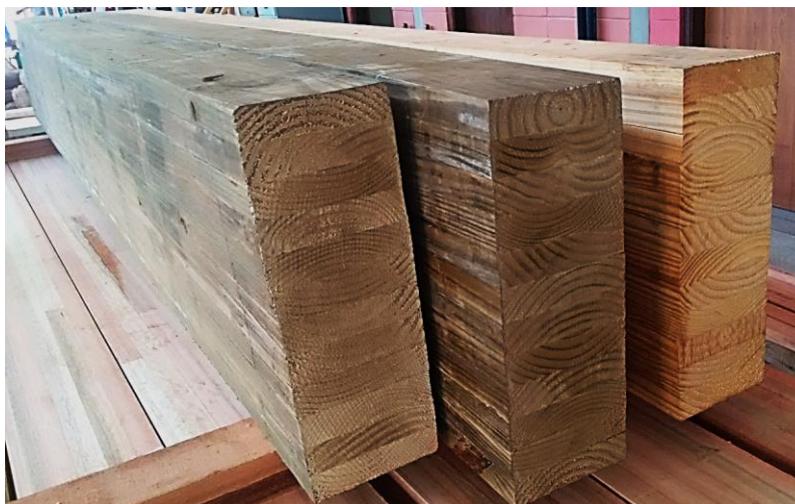


Figura 3.2: Elementos estruturais da espécie Pinus depois de realizado o tratamento preservante.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as características físicas do lote de elementos estruturais de MLC produzidos com madeira da espécie Pinus. As peças identificadas de P9 a P12 passaram por tratamentos ignífugos ou retardantes ao fogo, por imersão prolongada.

Tabela 3.2: Características físicas do lote de elementos de MLC da espécie Pinus.

CP	Dimensões (mm)			Área (m ²)	Momento de Inércia (m ⁴)	Volume (m ³)	Peso (Kg)	Densidade ρ_{ap} (Kg/m ³)
	Altura	Largura	Comprimento					
P1	419	148	3,54	0,062	9,07E-04	0,2	114,60	522,1
P2	421	150	3,54	0,063	9,33E-04	0,2	115,90	518,5
P3	420	150	3,54	0,063	9,26E-04	0,2	110,30	494,6
P4	420	150	3,54	0,063	9,26E-04	0,2	113,65	509,6
P5	423	148	3,54	0,063	9,33E-04	0,2	112,45	507,4
P6	421	149	3,54	0,063	9,27E-04	0,2	110,80	499,0
P7	420	150	3,55	0,063	9,26E-04	0,2	110,25	493,0
P8	420	150	3,54	0,063	9,26E-04	0,2	110,95	497,5
							Média	505
P9 – FR	420	150	3,54	0,063	9,07E-04	0,2	117,3	526,0
P10 – FR	420	150	3,54	0,063	9,33E-04	0,2	116,9	523,8
P11 - CCB	420	150	3,54	0,063	9,33E-04	0,2	112,4	503,6
P12 - CCB	420	150	3,54	0,063	9,27E-04	0,2	133,85	599,6
							Média	538

3.3. Caracterização das Propriedades das Madeiras

Para a caracterização das espécies de madeiras foram realizados ensaios com amostras em tamanho real para a determinação dos valores característicos das propriedades estruturais de madeira seguindo as diretrizes da norma Brasileira ABNT NBR 7190: 1997.

Os seguintes ensaios foram executados:

- Ensaio de Flexão Simples
- Ensaio de Compressão Paralela às fibras;
- Ensaio de Tração paralela às fibras

3.3.1. Ensaio de Flexão Simples

O ensaio de flexão simples teve como finalidade determinar a resistência e rigidez da madeira à flexão para os lotes de elementos de MLC.

O sistema de ensaio foi montado sobre uma laje de reação, sendo que os elementos do sistema de ensaios foram compostos por: pórtico de reação em aço, atuador hidráulico, sistema elétrico de pressão de óleo, células de carga, transdutores de deslocamento e equipamentos de aquisição de dados.

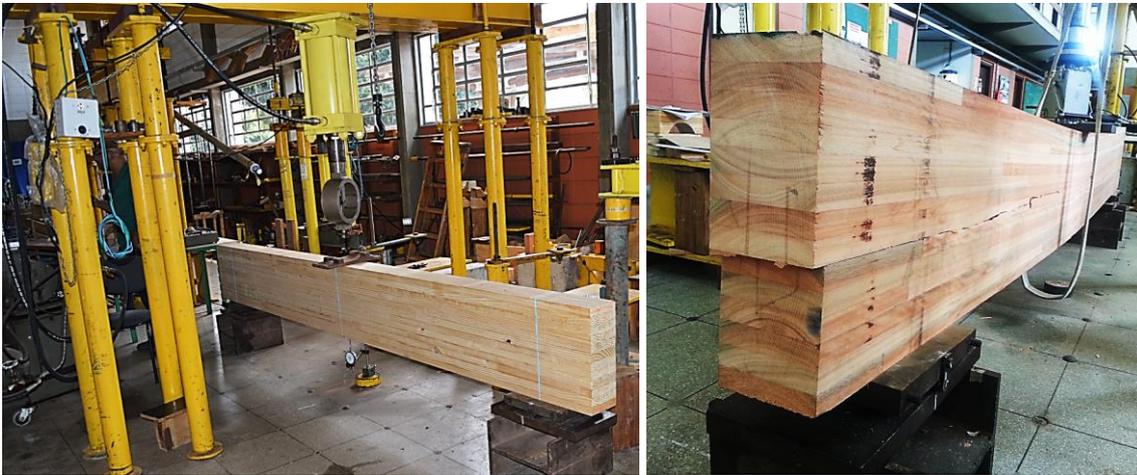


Figura 3.3: Ensaio de flexão simples.

Os ensaios de flexão simples à temperatura ambiente procuraram reproduzir as condições de ensaio a serem realizadas em temperaturas elevadas, no que se refere às dimensões dos elementos, aplicação do carregamento e condições de vinculação.

Os ensaios de flexão com aplicação de carregamento até a ruptura foram realizados em apenas duas vigas de cada lote, identificadas por (L1, L2) e (P1, P5), correspondentes, respectivamente, aos elementos do lote de madeira Lyptus® e Pinus. A

carga máxima estimada por meio dos ensaios em temperatura ambiente teve como finalidade determinar a carga a ser aplicada nos ensaios em temperatura elevada.

Para a determinação da rigidez da madeira à flexão caracterizada pelo Módulo de Elasticidade (MOE), realizou-se o teste em todas as vigas. Entretanto o carregamento não foi aplicado até a ruptura do elemento. Na Figura 3.4 é apresentado o diagrama carga versus deslocamento no meio do vão para uma viga de cada espécie. Observa-se que para o deslocamento limite é necessário à aplicação de uma carga mais elevada no elemento constituído por madeira de *Lyptus*[®].

O Módulo de Elasticidade foi determinado no trecho linear do diagrama carga versus deslocamento. A medida dos deslocamentos transversais no meio do vão foi realizada com o posicionamento de um medidor de deslocamento na face inferior do elemento, como mostrado na Figura 3.5. O medidor de deslocamento utilizado no trabalho foi um relógio comparador, marca Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm.

Os deslocamentos foram registrados até o limite estabelecido para condição de serviço, no caso, $L/300$, sendo L o vão livre da viga igual a 3000 mm. Nos testes nos quais o carregamento foi aplicado até a ruptura à instrumentação foi retirada quando alcançou o deslocamento limite e levando o carregamento até a ruptura do elemento.

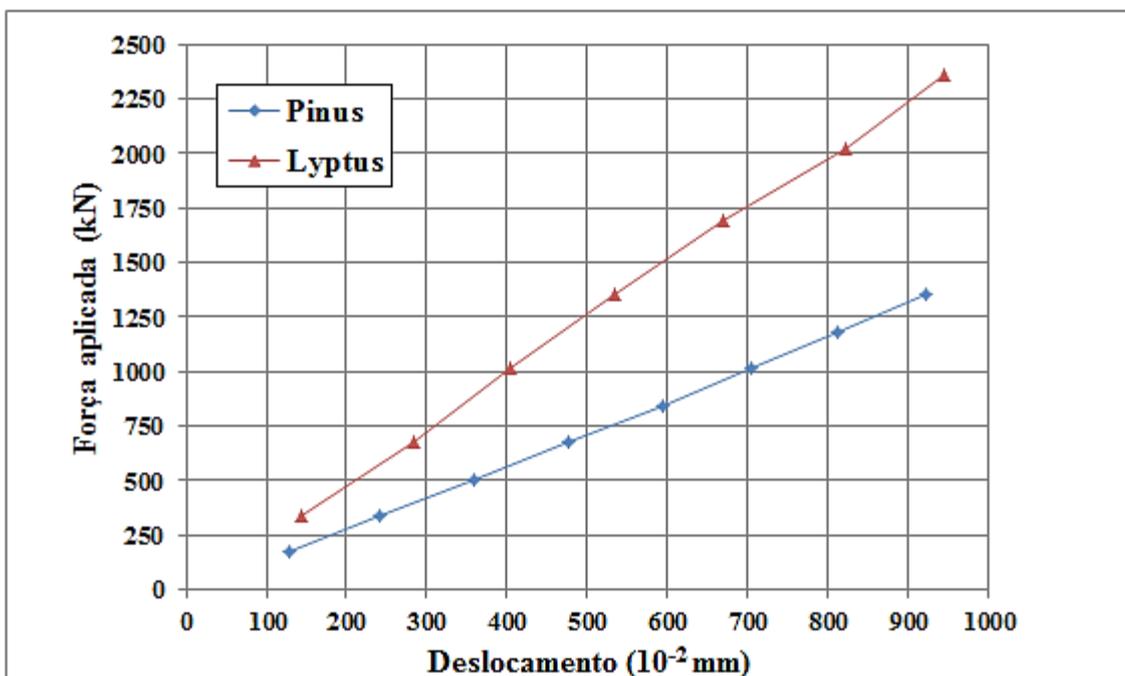


Figura 3.4: Diagrama força aplicada versus flecha na flexão

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, o Módulo de Elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga versus deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos $(F_{10\%}; v_{10\%})$ e $(F_{50\%}; v_{50\%})$, correspondentes,

respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada, sendo dado pela Equação 3.1:

$$MOE = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad \text{Equação 3.1}$$

Na Equação 3.1 valem:

- $F_{50\%}$ e $F_{10\%}$ são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao elemento, em newtons.
- $v_{50\%}$ e $v_{10\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao elemento, em metros.
- b e h correspondem, respectivamente, a largura e a altura da seção transversal do corpo de prova, em metros.
- L corresponde ao vão livre do elemento, em metros.



Figura 3.5: Instrumentação para medição dos deslocamentos transversais no meio do vão.

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores obtidos para a carga de ruptura e os módulos de elasticidade dos elementos estruturais. Há uma diferença em torno de 40% nos valores de rigidez entre as duas espécies de madeira.

O módulo de elasticidade determinado para os elementos estruturais, para os quais foram realizados tratamentos preservantes (P9 à P11) apresentaram uma pequena redução em relação aos elementos estruturais sem tratamento, como pode ser observado na Tabela 3.3.

Para os elementos estruturais da madeira Lyptus® foi obtida uma média da carga máxima igual a 356 kN, enquanto para os elementos preparados com madeira da espécie *Pinus* a média da carga máxima aplicada foi igual a 297 kN.

Tabela 3.3: Resultados obtidos nos ensaios de flexão a três pontos

Lyptus®			<i>Pinus</i>				
CP	MOR (MPa)	MOE (MPa)	CP	MOR (MPa)	MOE (MPa)	CP	MOE (MPa)
L1	61,6	14150	P1	52,4	8721	P9 – FR	6740
L2	59,4	13028	P2	-	7958	P10 – FR	6918
L3	-	13949	P3	-	7431	P11 – CCB	6918
L4	-	12115	P4	-	7934	P12 - CCB	6464
L5	-	12803	P5	46,7	7139		
L6	-	14677	P6	-	7718		
L7	-	13820	P7	-	7662		
L8	-	13144	P8	-	7702		
Média	61	13461	Média	50	7783	Média	6760

Na Figura 3.6 é possível ver o modo de ruptura ocorrido nos elementos estruturais. Na viga constituída de madeira de Lyptus® a ruptura ocorreu por cisalhamento, Figura 3.6 (a), enquanto que para a viga de *Pinus* a ruptura ocorreu por tensão normal de tração, Figura 3.6 (b).

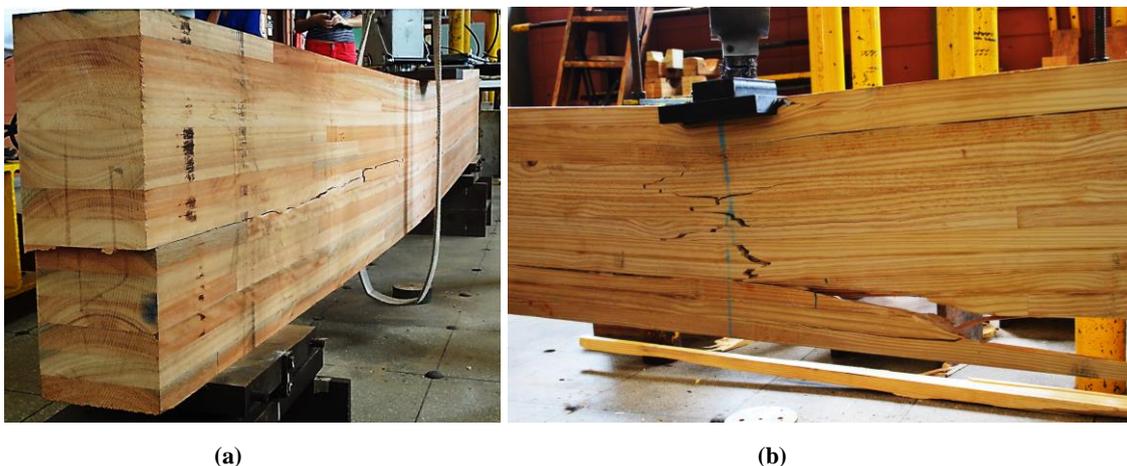


Figura 3.6: Elementos estruturais após a ruptura (a) Lyptus® (L1); (b) *Pinus* (P5)

3.3.2. Ensaio de Compressão Paralela às fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado com a finalidade de determinar as propriedades de resistência à compressão paralela às fibras da madeira seguindo as diretrizes da norma. Para a realização dos ensaios, as amostras foram

retiradas das vigas que foram utilizadas na determinação da carga máxima aplicada nos elementos no ensaio de flexão, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Para cada espécie de madeira foram preparados quatro corpos de prova (peças estruturais) com seção transversal de 210 por 150 mm e altura de 505 mm, conforme esquematiza a Figura 3.8.a e ilustra a Figura 3.8.b.

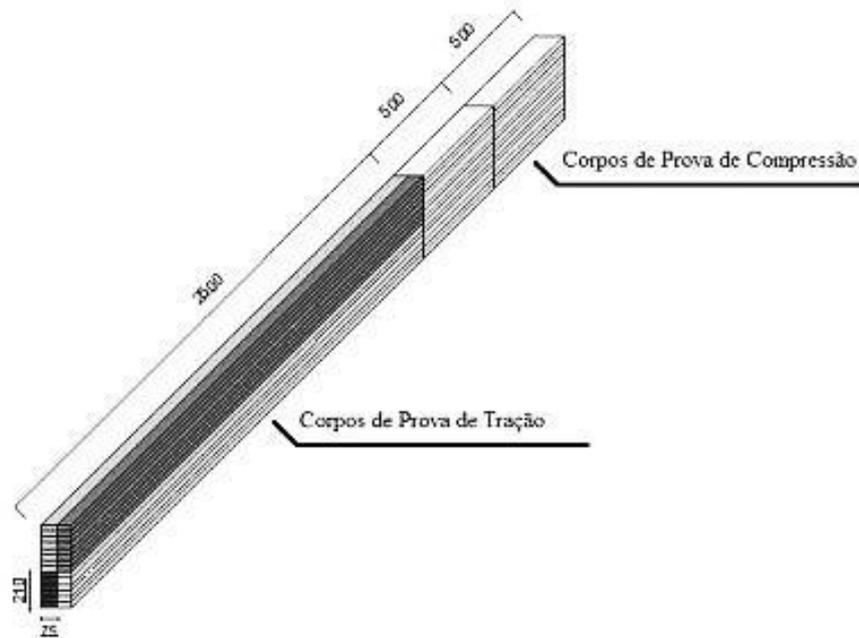


Figura 3.7: Layout da extração de corpos de prova dos elementos (dimensões em mm).

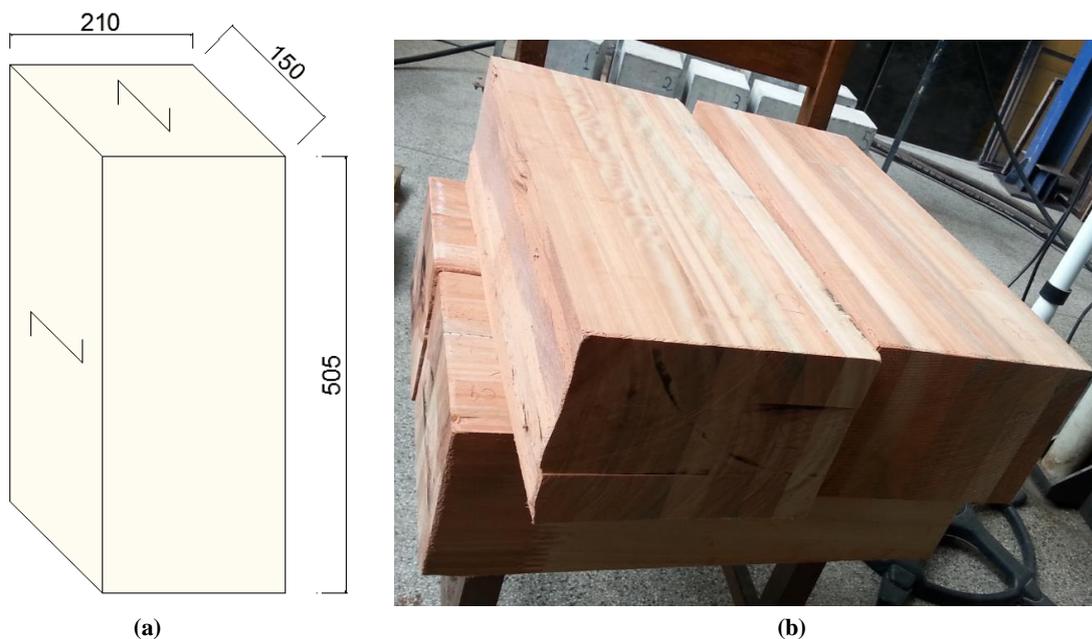


Figura 3.8: Corpos de prova de compressão: (a) Layout com as dimensões em mm; (b) amostras de Lyptus®.

Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica universal, marca INSTRON, modelo 8506, com capacidade para 2500 kN, conforme Figura 3.9. O

carregamento foi aplicado gradualmente até a ruptura da amostra, com uma taxa de 10 MPa/min. A leitura dos dados foi realizada por meio do sistema de aquisição, System 5000.

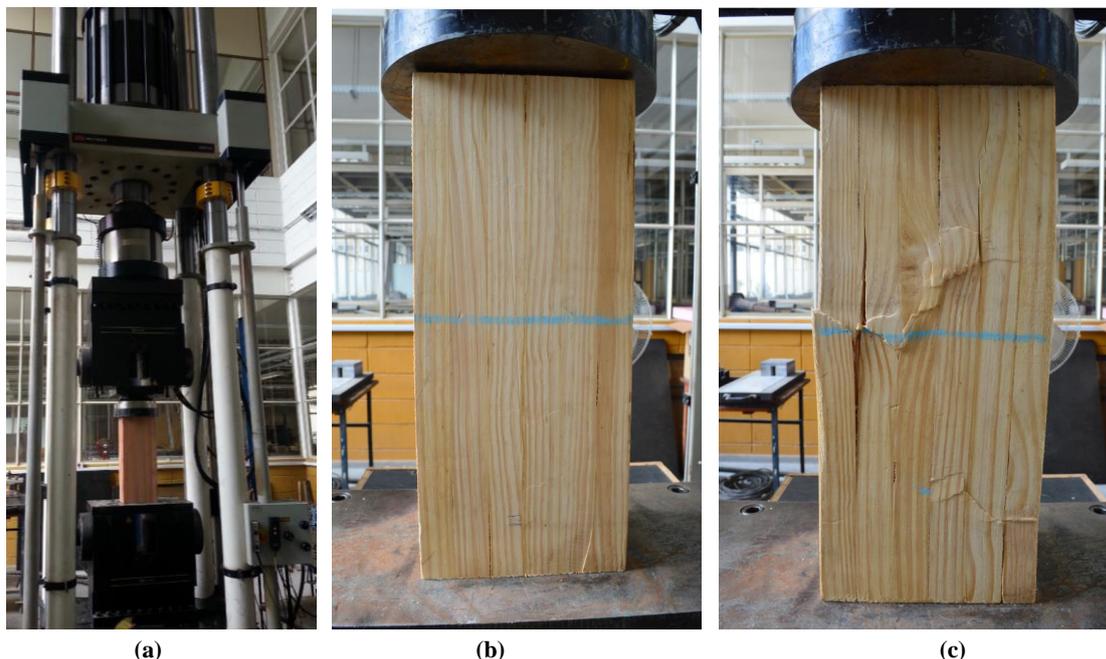


Figura 3.9: Ensaio de Compressão Paralela às fibras: (a) visão geral do equipamento, (b) amostra de Pinus antes do ensaio; (c) amostra de Pinus depois de ocorrido o ensaio.

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) em MPa foi dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar na seção transversal, e obtida pela Equação 3.2.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

- $F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão paralela aplicada durante o ensaio (em Newtons),
- A é a área inicial da seção transversal comprimida (em m^2),

Na Tabela 3.4 são apresentadas as dimensões das amostras e a carga máxima aplicada, bem como os resultados do cálculo para a resistência a compressão paralela às fibras.

Tabela 3.4: Características Físicas das amostras para o ensaio de compressão. (Continua)

Madeira	CP	Dimensões (mm)			Área (m^2)	$F_{c0,max}$ (kN)	f_{c0} (MPa)
		Altura	Seção Transversal (Base)				
Lyptus®	C1	505,0	210	150	0,0315	1930	61,3
	C2	505,0	215	149	0,0320	2044	63,8
	C3	509,0	205	151	0,0310	2032	65,6
	C4	503,0	227	151	0,0343	1783	52,0
Média						1947	60,7

Tabela 3.4: Características Físicas das amostras para o ensaio de compressão. (Conclusão)

Madeira	CP	Dimensões (mm)			Área (m ²)	F _{c0,max} (kN)	f _{c0} (MPa)
		Altura	Seção Transversal (Base)				
Pinus	C1	495,0	210,0	150	0,0315	1058	33,6
	C2	500,0	212,0	150	0,0318	1028	32,3
	C3	500,0	209,0	147	0,0307	940,1	30,6
	C4	502,0	210,0	147	0,0309	987,3	32,0
Média						1003	32,1

3.3.3. Ensaio de tração paralela às fibras

O ensaio de tração paralela às fibras foi realizado com a finalidade de se determinar as propriedades de resistência a tração paralela às fibras da madeira seguindo as diretrizes da ABNT NBR 7190: 1997.

Para a realização do ensaio, as amostras foram retiradas das vigas que foram utilizadas na determinação da carga máxima aplicada nos elementos no ensaio de flexão, conforme ilustrado na Figura 3.7. Os elementos foram inicialmente cortados na serra de fita Figura 3.10 (a) e finalizados na plaina, como mostrado na Figura 3.10 (b).



Figura 3.10: Processo de preparação dos corpos de prova. (a) Serra de Fita; (b) Plaina.

Para cada espécie de madeira foram preparados quatro corpos de prova (peças estruturais), entretanto devido ao modo de ruptura ocorrido nos elementos não foi possível retirar as amostras com comprimentos iguais para ambas às espécies. As amostras da espécie de madeira Pinus ficaram com as seguintes dimensões: seção transversal de 170 por 60 mm e comprimento de 1780 mm. Porém, para a madeira de

Lyptus[®] foram consideradas: seção transversal de 170 por 60 mm e comprimento de 2475 mm. O layout das amostras é apresentado na Figura 3.11.

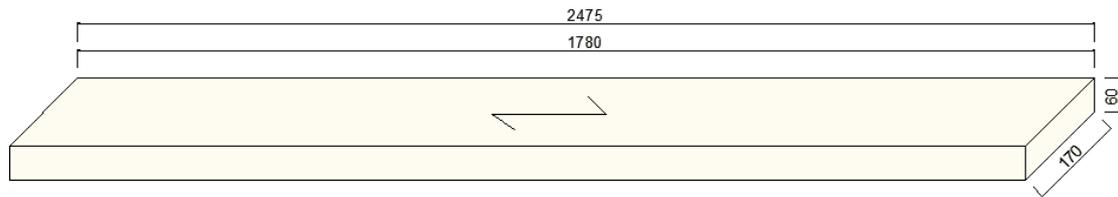


Figura 3.11: Layout dos corpos de prova de tração paralela às fibras.

Os ensaios foram realizados em uma máquina para testes de tração, marca METRIGUARD, modelo 422, apresentada na Figura 3.12. O carregamento foi aplicado gradualmente até a ruptura da amostra.



Figura 3.12: Máquina para ensaios de tração marca METRIGUARD.

A resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar na seção transversal, sendo obtida pela Equação 3.3.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

- $F_{t0,max}$ é a máxima força de tração aplicada durante o ensaio (em Newtons),
- A é a área inicial da seção transversal comprimida (em m²),
- f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras (em MPa).

Na Tabela 3.5 são apresentadas as dimensões das amostras e a carga máxima aplicada, bem como os resultados obtidos por meio da Equação 3.3 para a determinação da resistência a tração paralela às fibras.

Tabela 3.5: Características Físicas das amostras para o ensaio de tração.

Madeira	CP	Dimensões (mm)			Área (m ²)	F _{t0,max} (kN)	f _{t0} (MPa)
		Comprimento	Seção Transversal (Base)				
Lyptus®	T1	2476	171	59,0	0,010	590	58,5
	T2	2475	170	60	0,010	511	50,1
	T3	2475	172	60	0,010	505	48,9
	T4	2480	171	58	0,010	468	47,2
				MÉDIA	518,5	51,2	
Madeira	CP	Dimensões (mm)			Área (m ²)	F _{t0,max} (kN)	f _{t0} (MPa)
		Comprimento	Seção Transversal (Base)				
Pinus	T1	1781	170	62	0,011	296	28,1
	T2	1781	170	61	0,010	390	37,6
	T3	1782	172	62	0,011	326	30,6
	T4	1788	170	62	0,011	143	13,6
				MÉDIA	288,8	27,5	

3.4. Ensaio de Propagação de Chamas

Os ensaios de avaliação de propagação das chamas foram realizados no equipamento de Schlyter Modificado, aparato de ensaio não normatizado proposto pelo Laboratório de Produtos Florestais em Wiscosin, EUA (FPL – Forest Products Laboratory), apresentado na Figura 3.13 (a). Informações sobre a elaboração e proposta do ensaio são apresentadas por Kleck e Martin (1956) e Aguillar Filho (1986).

O equipamento utilizado foi construído por Aguillar Filho durante a realização do projeto de mestrado intitulado “*Combustibilidade e tratamento ignífugos da madeira*”. O equipamento consiste de uma armação metálica destinada a fixar dois painéis de madeira, ambos na posição vertical e paralela entre si, um bico de gás (queimador próprio) e uma escala para a determinação da altura das chamas, conforme Figura 3.13 (b).

Os dois corpos de prova são ajustados, de modo que as superfícies a serem ensaiadas, fiquem paralelas e separadas entre si de 5 cm, com a base de uma delas 10 cm acima da base da outra. Foi instalada uma escala no aparato, para a determinação da altura das chamas durante o ensaio, de modo que as graduações fossem visíveis quando observadas por entre os corpos de prova. A fonte de ignição é proveniente de um bico de gás tipo Meeker nº 4, com um dispositivo em forma de “T”, especialmente construído, adaptado na parte superior para distribuição das chamas. A peça em forma de “T” foi

construída com um tubo de latão de 13 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro externo, tendo as extremidades fechadas, conforme Figura 3.14.

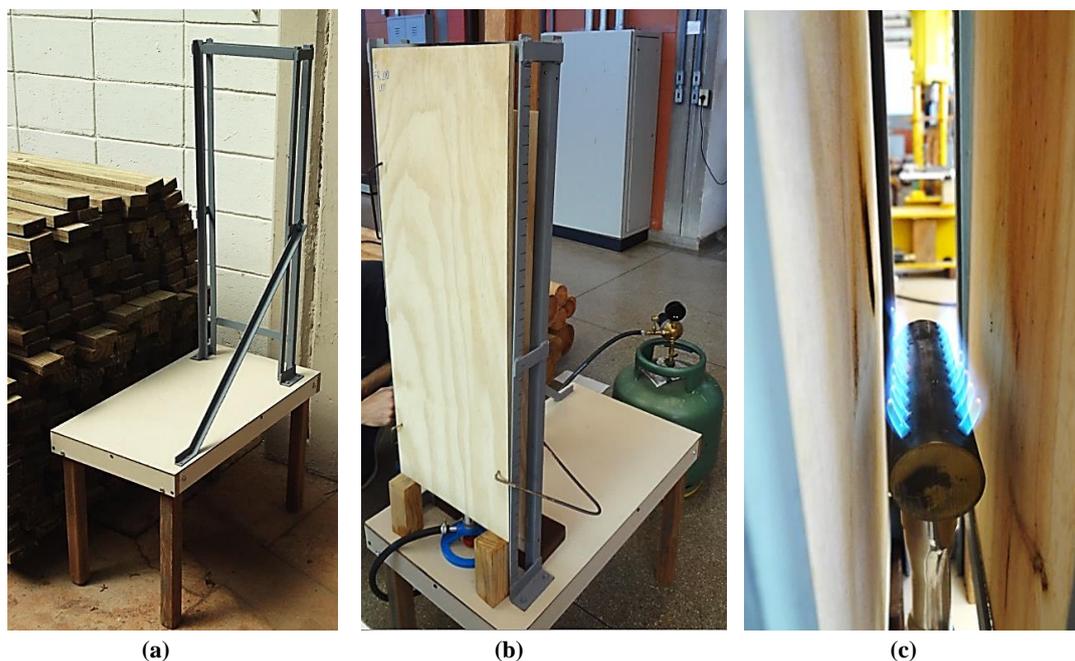


Figura 3.13: Aparato de Ensaio Schlyter Modificado: (a): Dispositivo (visão geral); (b) Posicionamento das amostras; (c) Distribuidor de chamas.



Figura 3.14: Dispositivo para distribuidor de chamas

Os orifícios de ar do dispositivo em T devem produzir chamas azuis no topo (Figura 3.14), sendo o gás (8.600 kcal/m^3) regulado para um fluxo de $0,5 \text{ m}^3/\text{hora}$. O queimador é inserido entre os painéis, equidistante das faces e das suas extremidades laterais, mantendo-se o “T” paralelo às faces das amostras. A altura da chama sobre os painéis é registrada imediatamente após iniciado o ensaio e, a partir de então, a intervalos de 15 segundos. Desligou-se o queimador após 3 minutos.

3.4.1. Amostras

As amostras consistiram em painéis de madeira compensada da espécie Pinus, tratadas com retardantes de chamas em fase de teste desenvolvidos pela empresa

Montana Química S.A. Os painéis foram preparados pela empresa seguindo as recomendações de aplicação, e posteriormente transportadas para o LaMEM (EESC – USP) para a execução dos ensaios. As dimensões das amostras resultaram iguais a 230 mm de largura, 14 mm de espessura e 800 mm de comprimento.

Foram avaliados cinco tipos diferentes de tratamento retardantes a chamas com a finalidade de se avaliar o produto de melhor desempenho. Painéis sem tratamento foram utilizados como testemunha. Os tratamentos foram realizados por imersão dos painéis durante 10 minutos ou por autoclave. A distribuição e identificação das amostras são apresentadas na Tabela 3.6, bem como o tipo de tratamento.

Tabela 3.6: Identificação das amostras analisadas.

Identificação	Legenda	Tipo de Tratamento	Quantidade de amostras	Identificação para ensaio
Osmoguard FR 100 (I)	FR 1 (I)	Imersão 10 min.	4	FR1D-1 / FR1D-2
Osmoguard FR 100 (II)	FR 1 (II)	Imersão 10 min.	4	FR1DM-1 / FR1DM-2
Osmoguard FR 400 (I)	FR 4 (I)	Imersão 10 min.	4	FR4D-1 / FR4D-2
Osmoguard FR 400 Normal	FR 4 (N)	Imersão 10 min.	4	FR4-1 / FR4-2
Osmoguard FR 100 Normal	FR 1 (N)	Autoclave	4	FR1-1 / FR1-2
Testemunha	TEST.	Sem tratamento	6	T-1 / T-2 / T-3

3.4.2. Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios consistem principalmente na determinação da propagação das chamas nos painéis (altura da região carbonizada) e duração das chamas após o queimador ser desligado. Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados para a propagação das chamas (P), o instante em que ocorreu a máxima propagação (I) e por fim, a duração das chamas após desligado o queimador (D).

Com exceção das amostras que foram utilizadas como testemunho (sem tratamento), a propagação de chama manteve-se constante desde o início, razão pela qual o instante registrado como máximo foi de 15 segundos.

Durante os ensaios com painéis sem tratamento foi necessário aumentar a altura da régua graduada, pois as chamas ultrapassaram os limites do equipamento.

Tabela 3.7: Resultados dos ensaios

Tratamento	P (mm)	I (seg.)	D (seg.)
FR 100 (I)	5	15	0
FR 100 (II)	5	15	0
FR 400 (I)	5	15	0
FR 400 (Normal)	5	15	0
FR 100 (Normal)	5	15	0
Testemunho	445	130	27

Depois de finalizado o ensaio realizou-se a avaliação visual da carbonização dos painéis. Na Tabela 3.8 são apresentados os valores obtidos para a altura da área carbonizada (h), determinados a partir das medidas da área carbonizada, sendo a maior medida registrada entre os dois painéis.

Tabela 3.8: Altura da área carbonizada nos painéis.

CP	h (cm)	Observação
FR1D -1	6,5	
FR1D -2	10	
FR1DM - 1	4	Mancha marrom
FR1DM - 2	0	
FR4D - 1	0	
FR4D - 2	8	
FR4 - 1	9	
FR4 - 2	4	
FR1 - 1	6	
FR1 - 2	9	
T -1	53,5	
T - 2	57,5	
T - 3	55,5	

Da Figura 3.15 à Figura 3.18 apresenta-se o aspecto final depois de realizado o ensaio de Schlyter Modificado. A região escura indica a parte carbonizada da madeira sendo a sua altura registrada na Tabela 3.8 (observação visual). A área em destaque na Figura 3.15 (a) ocorreu devido a um erro de posicionamento do queimador ao iniciar o ensaio, sendo que este ficou mais próximo do painel onde está delimitada a região em destaque.



Figura 3.15: Painéis depois de expostos a chamas: (a) FR 100 DAP; (b) FR100 (II).



Figura 3.16: Painéis depois de expostos a chamas: (a) FR 400 (I); (b) FR 400 Normal.



Figura 3.17: Painéis depois de expostos a chamas com o tratamento FR 100 Normal Autoclave



Figura 3.18: Painéis sem tratamento depois de expostos a chamas.

Pode-se observar na Tabela 3.8 e nas imagens (Figura 3.15 a Figura 3.18) dos painéis depois de realizado o ensaio, que os tratamentos analisados apresentaram uma excelente eficiência quanto à redução da propagação de chamas. Em alguns painéis foi observada apenas uma mancha de coloração amarelo escuro e não houve início de carbonização.

Os tratamentos OSMOGUARD FR 100 (II) e FR400 (I) apresentaram uma propagação das chamas aproximadamente nula, em relação ao que ocorre em painéis sem tratamento. Entre os dois produtos de melhor desempenho, o painel tratado com OSMOGUARD FR 100 (II) apresentou menos alteração, Figura 3.15 (b), apresentando apenas uma leve mancha marrom no local em contato com o fogo.

Para os painéis com tratamento a altura da chama se manteve constante durante o ensaio. Entretanto, para os painéis sem tratamento, após dois minutos de exposição ao fogo, ocorreu a máxima propagação das chamas. Além disso, as chamas cessaram imediatamente depois de desligado o queimador nos testes com painéis tratados, fato que não ocorreu nos painéis sem tratamento, como pode ser observado na Tabela 3.7.

Os resultados obtidos a partir dos testes com o equipamento Schlyter Modificado foram de caráter exploratório para determinação do produto com melhor desempenho desenvolvido pela empresa Montana Química S.A. Com base nos resultados, se definiu o produto OSMOGUARD FR 100 (II) para ser adotado na segunda fase dos testes para liberação do produto no mercado.

3.4.3. Ensaio no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

A segunda fase de testes com o produto OSMOGUARD FR 100 (II) foi realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Os ensaios foram solicitados

pela empresa Montana Química S.A para certificação do produto e liberação para uso comercial. Foram realizados ensaios normatizados para determinação do Índice de Propagação de chama, de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 9442:1986 e determinação da Densidade Óptica específica máxima estipulada pela ASTM E 662-15.

O painéis tratados com o produto apresentaram Índice de Propagação superficial de chama (l_p) igual a 3 e Densidade específica óptica da fumaça (D_m) igual a 200.

Com base nos resultados e de acordo com a Tabela 3.9 retirada da Instrução técnica nº 10 do Decreto nº 56.819 do Corpo de Bombeiros de São Paulo, o produto classifica-se como II-A.

Tabela 3.9: Classificação dos materiais exceto revestimento de piso.

Classes		ISO 1182	NBR 9442	ASTM E662	
I		Incombustível	-	-	
II	A	Combustível	$l_p \leq 25$	$D_m \leq 450$	
	B		$l_p \leq 25$	$D_m > 450$	
III	A		$25 < l_p \leq 75$	$D_m \leq 450$	
	B		$25 < l_p \leq 75$	$D_m > 450$	
IV	A		$75 < l_p \leq 150$	$D_m \leq 450$	
	B		$75 < l_p \leq 150$	$D_m > 450$	
V	A		$150 < l_p \leq 400$	$D_m \leq 450$	
	B		$150 < l_p \leq 400$	$D_m > 450$	
VI				$l_p \geq 400$	-

Após os resultados positivos nas fases de teste, o produto foi lançado no mercado como OSMOGUARD® FR100. A avaliação do produto não era um dos objetivos do trabalho, mas devido aos resultados satisfatórios e a parceria com a empresa Montana Química S.A adotou-se a utilização do produto retardantes ao fogo, OSMOGUARD® FR100, nos elementos estruturais de MLC para avaliação da influência nos valores de taxa de carbonização.

3.5. Ensaios em temperaturas elevadas

Os testes em temperaturas elevadas realizados no forno do Departamento de Estruturas – SET e divididos em duas etapas. A primeira etapa consistiu na avaliação da carbonização dos elementos estruturais, e conseqüentemente, na determinação da seção transversal residual após um determinado tempo de exposição ao fogo. A segunda etapa teve como finalidade determinar a resistência ao fogo dos elementos estruturais com aplicação de uma carga concentrada.

3.5.1. Forno Horizontal a gás

O desenvolvimento do trabalho em temperaturas elevadas foi realizado em um forno horizontal de grande escala, com dimensões internas de 3,0 x 4,0 x 1,5 m, instalado nas dependências do Departamento de Engenharia de Estruturas da USP – São Carlos no Laboratório de Estruturas.

O forno foi adquirido por meio do Projeto Temático FAPESP 2006/06742-5, aprovado em 2008, com o título “*Segurança das Estruturas em Situação de Incêndio*”. Trata-se de um forno horizontal para ensaios de elementos estruturais (vigas e lajes) em temperaturas elevadas, com funcionamento a gás, no qual a temperatura máxima possível de ser alcançada é 1260 °C. Na Figura 3.19 (a) é apresentado o forno horizontal e sua estrutura de carregamento com a utilização de pórticos de reação. Na Figura 3.19 (b) são mostrados detalhes do interior do forno, revestimento nas paredes com módulos de fibra cerâmica e no piso com tijolos de alta resistência mecânica e térmica.



Figura 3.19: Forno Horizontal para ensaios de lajes e vigas: (a) visão geral (b) detalhes do interior

O aquecimento do forno é realizado por meio de oito queimadores, marca Kromschroder, com potência total de 3600 kW e função ON/OFF. Os queimadores são programados para realizar o aquecimento do forno de acordo com a curva de incêndio-padrão requerida. O controle da temperatura interna do equipamento é realizado pela temperatura média de nove termopares distribuídos nas paredes laterais do forno.

A função ON/ OFF dos queimadores é utilizada para manter a média da temperaturas internas do forno nos limites especificados em normas. Desta maneira, os queimadores são ligados e desligados automaticamente durante todo o ensaio.

A curva de incêndio-padrão adotada no trabalho segue as diretrizes propostas pela ISO 834-1:1999 “*Fire –Resistance Tests – Elements of Building construction*”. De acordo com a ISO 834 a temperatura média do forno, obtida a partir da leitura dos termopares deve ser monitorada e controlada pela Equação 3.4.

$$T = 345 \cdot \log (8t + 1) + 20$$

Equação 3.4

Para a Equação 3.4. valem:

T a temperatura média do forno, em graus Celsius (°C);

t é o tempo, em minutos.

A norma brasileira ABNT NBR 14432: 2000 “*Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimentos*”, que estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais em situação de incêndio adota a elevação padronizada de temperatura em função do tempo conforme a ISO 843-1: 1999.

Na Figura 3.20 é apresentada a curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834 obtida a partir da Equação 3.4, bem como, as tolerâncias admitidas pela norma. A curva temperatura versus tempo a partir da média das leituras registradas pelos nove termopares de controle instalados no forno está representada na imagem da Figura 3.20.

Os queimadores são programados para funcionar dentro dos limites das curvas de tolerâncias (inferior e superior, ambas destacadas em vermelho na Figura 3.20). Desta maneira, quando a temperatura média do forno aproxima-se ou ultrapassa a curva de tolerância superior, quatro queimadores são desligados automaticamente, e no caso oposto, temperaturas próximas à curva de tolerância inferior, todos queimadores são ligados.

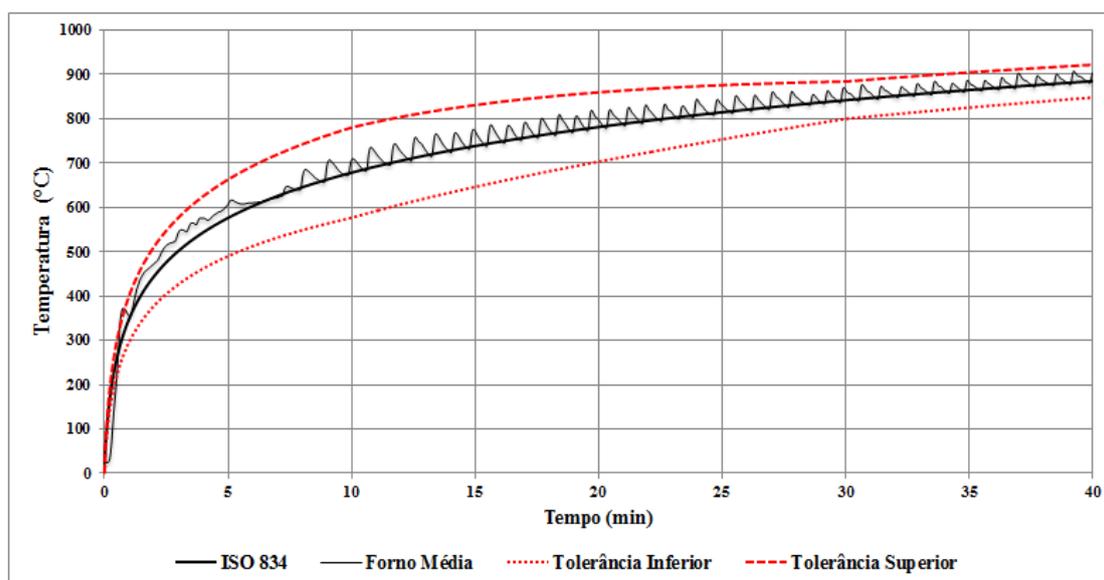


Figura 3.20: Curva de Aquecimento tempo versus temperatura.

3.5.2. Avaliação da carbonização dos elementos estruturais

A avaliação da carbonização dos elementos estruturais teve como finalidade determinar a taxa de carbonização de duas espécies de madeiras brasileira, provenientes de florestas reflorestadas.

A taxa de carbonização (β) é a velocidade de propagação da camada carbonizada para o interior da seção transversal, que é usualmente expressa como uma distância (espessura da camada carbonizada) por unidade de tempo (duração da exposição ao fogo). Sendo o principal parâmetro para descrever o comportamento ao fogo de estruturas de madeira.

Os elementos estruturais de MLC, da espécie de madeira *Eucalyptus*, representam o grupo das folhosas (*Hardwood*, terminologia em inglês), com uma densidade média em torno de 742 Kg/m³, enquanto os elementos da espécie de madeira *Pinus*, representam o grupo das coníferas (*Softwood*, terminologia em inglês), com uma densidade média em torno de 505 Kg/m³.

Foram realizados dois ensaios para avaliação da seção transversal remanescente dos elementos sem aplicação de carregamento. Cada teste consistia na análise de quatro vigas simultaneamente, sendo duas da espécie *Lyptus* e duas da espécie *Pinus* posicionadas paralelamente e intercaladas, espaçadas por uma distância de 680 mm, como ilustrado na Figura 3.21.

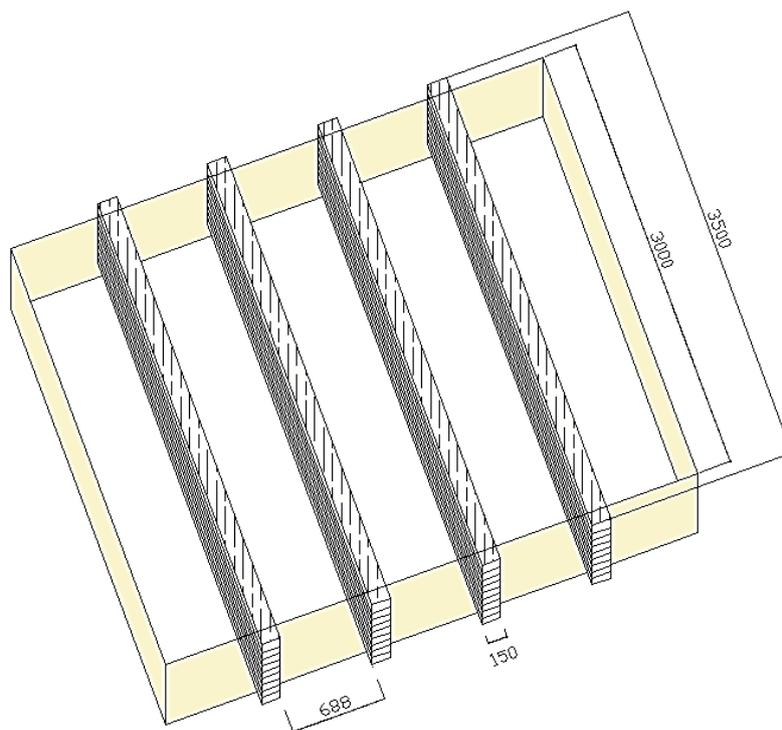


Figura 3.21: Layout do posicionamento de distribuição das vigas por ensaio (dimensões em mm)

Um ensaio composto apenas por elementos da espécie de madeira Pinus, tratados quimicamente por meio de impregnação, teve com finalidade avaliar a influência de tratamentos preservantes na carbonização da madeira. Nas vigas preparadas com madeira da espécie Lyptus[®], não houve a avaliação de tratamentos, devido à baixa absorção de produtos.

Os tratamentos utilizados foram OSMOGUARD[®] FR 100, produto retardantes de chamas altamente efetivo contra a propagação do fogo, sendo avaliado por meio do ensaio de Schlyter Modificado, bem como o produto MOQ[®] OX 50-CCB-O, preservante hidrossolúvel, de ação fungicida e inseticida, classificado quimicamente como Borato de Cobre Cromatado Óxido, que deixa a madeira com coloração verde. Os tratamentos foram realizados pela Montana Química S.A, na sede da empresa localizada em São Paulo.

Na Tabela 3.10 são apresentadas as identificações das séries e o tempo de exposição ao fogo durante os ensaios.

Tabela 3.10: Informações sobre os ensaios para avaliação da Taxa de Carbonização

Identificação	Espécie de Madeira	Tratamento Preservante
T1 – LP 30	Lyptus / Pinus	-
T2 – LP 40	Lyptus / Pinus	-
T3 – PRES.	Pinus	CCB / FR

3.5.2.1. Instrumentação dos elementos (Termopares)

Para a análise da distribuição de temperatura no interior dos elementos durante a realização dos ensaios foram utilizados termopares do tipo K (diâmetro de 2,5 mm). Os termopares são formados por fios de Chromel, como termoelemento positivo, e Alumel, como termoelemento negativo, sendo adequado para medição contínua da temperatura desde -200°C até 1260°C .

A leitura da temperatura foi realizada no ponto em que ocorre a junção dos dois fios (Chromel e Alumel), cuja união foi realizada por meio da soldagem dos fios (positivo e negativo), preparada com o equipamento TAU (Thermocouple Attachment Unit), marca STORK, modelo 41757, mostrado na Figura 3.22 (a). A outra extremidade do cabo foi ligada a um conector para a ligação ao sistema de aquisição de dados do forno, conforme Figura 3.22 (b).

Os termopares foram posicionados entre as linhas de cola em diferentes profundidades ao longo da altura da seção transversal, como ilustrado na Figura 3.23. Com o registro das temperaturas foi possível monitorar a carbonização da seção dos elementos durante a execução do ensaio. De acordo com a EN 1995-1-2, pode se considerar a camada carbonizada a posição da isotérmica de 300°C .

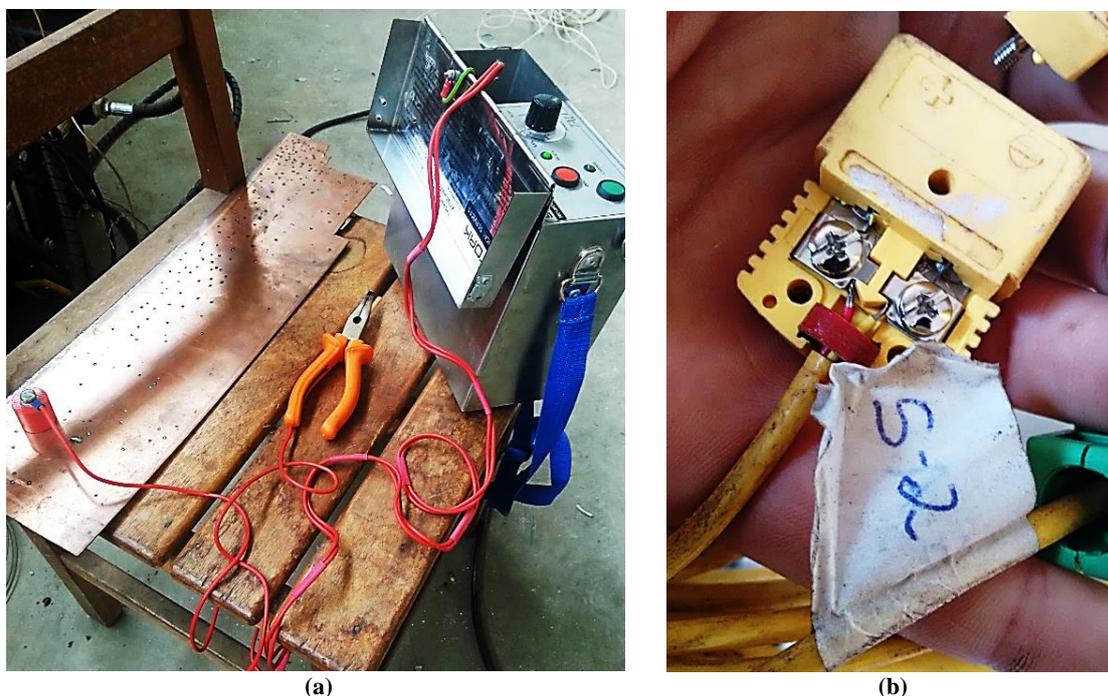


Figura 3.22: Preparação dos termopares: (a) Equipamento para soldagem das extremidades; (b) conectores.

Na Figura 3.23 são indicadas as profundidades em que cada termopar foi posicionado, equidistantes em 25 mm, sendo os pontos de leitura indicados pelas letras

A, B, C, D, E. Os pontos C1, C2, C3 foram posicionados na mesma profundidade em relação à altura. Entretanto, em profundidades diferentes em relação à largura da peça.

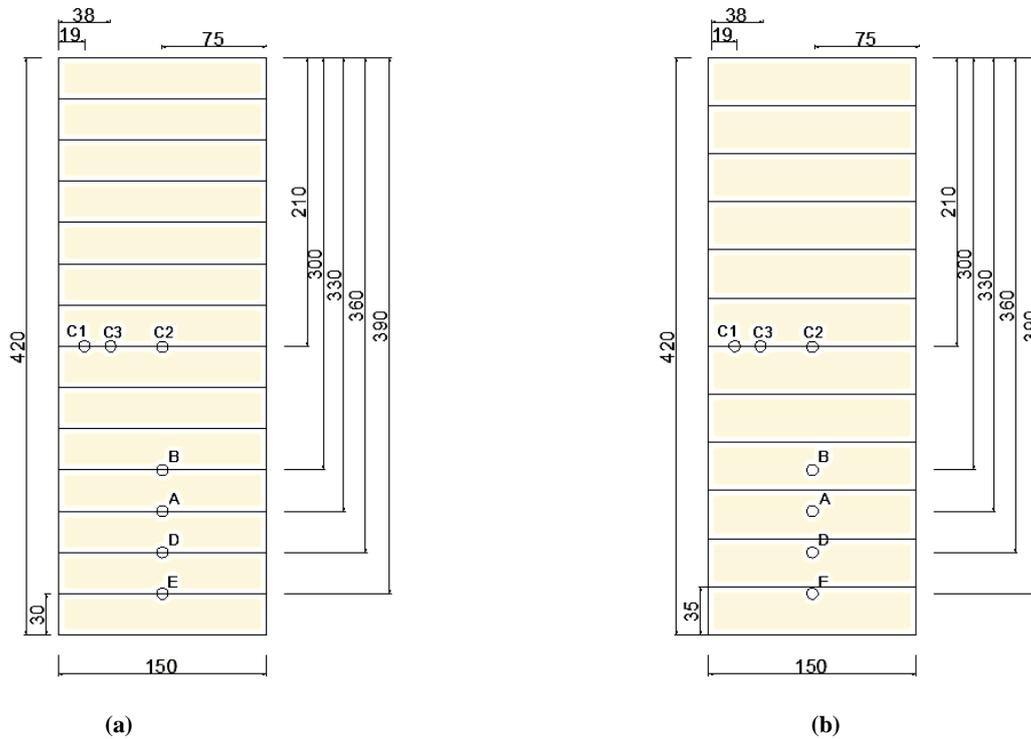


Figura 3.23: Layout da distribuição dos termopares: (a) Lyptus®; (b) Pinus. Dimensões em milímetros.

Para avaliação da uniformidade de aquecimento no interior do forno, um termopar (posição E) foi instalado a 875 mm do meio do vão do elemento, como mostrado na Figura 3.24, para distinção entre o ponto instalado no meio do vão, o ponto adicional foi identificado como E1.

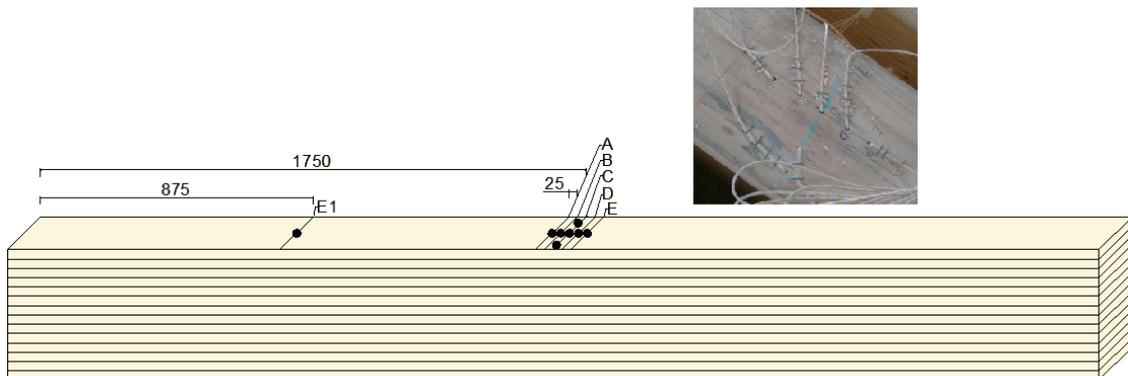


Figura 3.24: Distribuição dos termopares ao longo do comprimento do elemento. Dimensões em milímetros.

Para o posicionamento dos termopares em diferentes profundidades, como mostrado na Figura 3.23, foi necessário realizar furos com diâmetro de quatro milímetros. Os furos foram realizados a partir da face superior (face não exposta ao fogo), com a utilização de uma furadeira, conforme Figura 3.25 (a).

Para alcançar a profundidade desejada a partir da face superior, foi preparado um prolongamento no comprimento das brocas, uma vez que não se encontra no mercado brocas com diâmetro de 4 mm e, com comprimentos superiores a 8 cm.



Figura 3.25: Posicionamento dos termopares: (a) furos na face superior (b) Broca com prolongadores.

A extensão no comprimento das brocas, conforme Figura 3.25 (b) foi realizada com a utilização barra de aço prata sendo soldada a broca com comprimento padrão, resultando em brocas com comprimento igual a 25 cm e 48 cm. Com o comprimento ideal das brocas, foi então executada a perfuração das vigas até a profundidade estipulada para leitura das temperaturas.

Na Figura 3.26 é mostrada a face superior de inserção dos termopares tipo K, sendo o comprimento adicional dos termopares, fora da seção transversal, definido de acordo com a distância até o sistema de aquisição de dados.

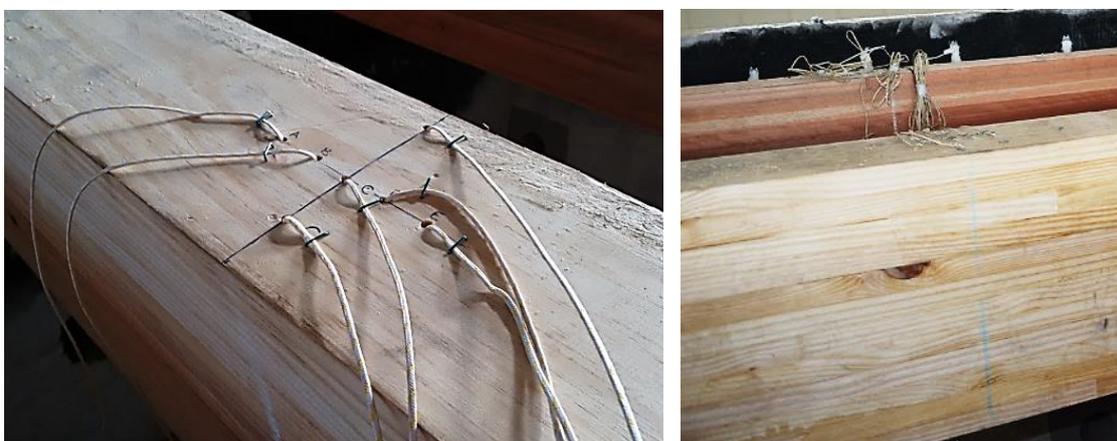


Figura 3.26: Face de inserção dos termopares.

3.5.2.2. Posicionamento dos Elementos Estruturais

A contribuição principal do trabalho desenvolvido em elementos estruturais de MLC se volta ao estudo sobre a carbonização das espécies brasileiras, sendo este o principal parâmetro para descrever o comportamento ao fogo de estruturas de madeira.

A metodologia de ensaio adotada para a realização dos ensaios foi definida a partir de discussões com os pesquisadores, Dr. Andrea Frangi, Dr. Michael Klippel e Dr. Pedro Palma, todos pertencentes ao Instituto Federal Tecnológico de Zurique (ETH-Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), localizado na Suíça, no qual foi realizado o intercâmbio.

Durante o período de estágio, foi realizada uma visita técnica ao laboratório de segurança ao incêndio - SP em Borås, Suécia, no qual foi possível discutir a metodologia de ensaios proposta com pesquisadores que atuam no Instituto, em especial, com o Dr. David Lange, autor principal do artigo intitulado “*Charring rate of timber in natural fire*”, no qual foi discutido resultados de ensaios com metodologia semelhante.

O método aplicado nos ensaios consistiu em posicionar as vigas paralelamente na parte superior do forno, sendo duas da espécie de madeira Pinus e duas de Lyptus, intercaladas e espaçadas em 68 cm, como apresentado na Figura 3.27.

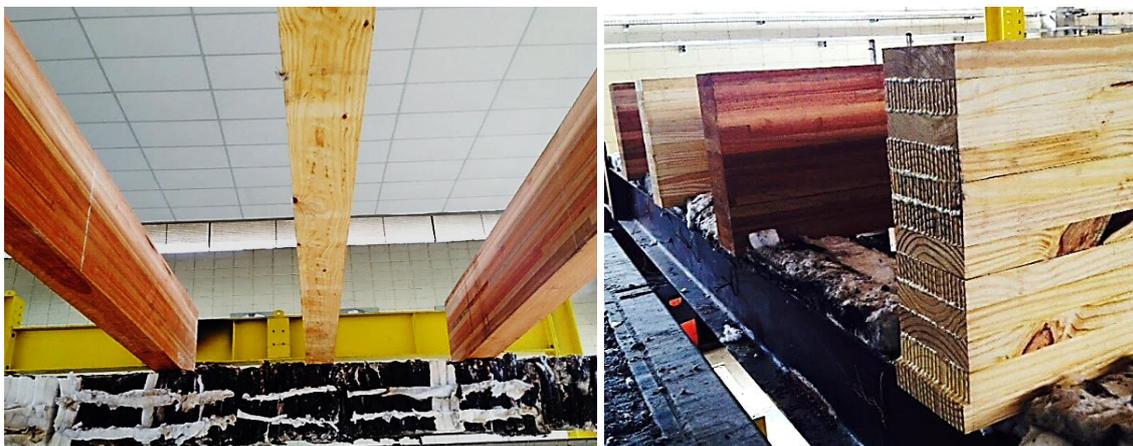


Figura 3.27: Posicionamento dos elementos estruturais para a realização dos ensaios.

Para a determinação da taxa de carbonização a partir da seção transversal residual, foi necessário estipular o tempo em que os elementos ficariam em exposição ao fogo. Depois de desligados os queimadores, a madeira continua o processo de carbonização, razão pela qual se faz necessário extinguir as chamas remanescentes em um curto período de tempo, para não prejudicar os resultados.

Para a realização dos ensaios foi construído um quadro metálico para apoiar os elementos na parte superior do forno, conforme Figura 3.28 (a). O quadro foi posicionado sobre uma viga de rolamento fixada aos pórticos de reação, como ilustrado na Figura 3.28 (b) e Figura 3.29, o qual permite ao final do ensaio fazer a remoção do quadro metálico em um curto período de tempo e extinguir as chamas residuais nos elementos com jato de água, como mostrado na Figura 3.30.

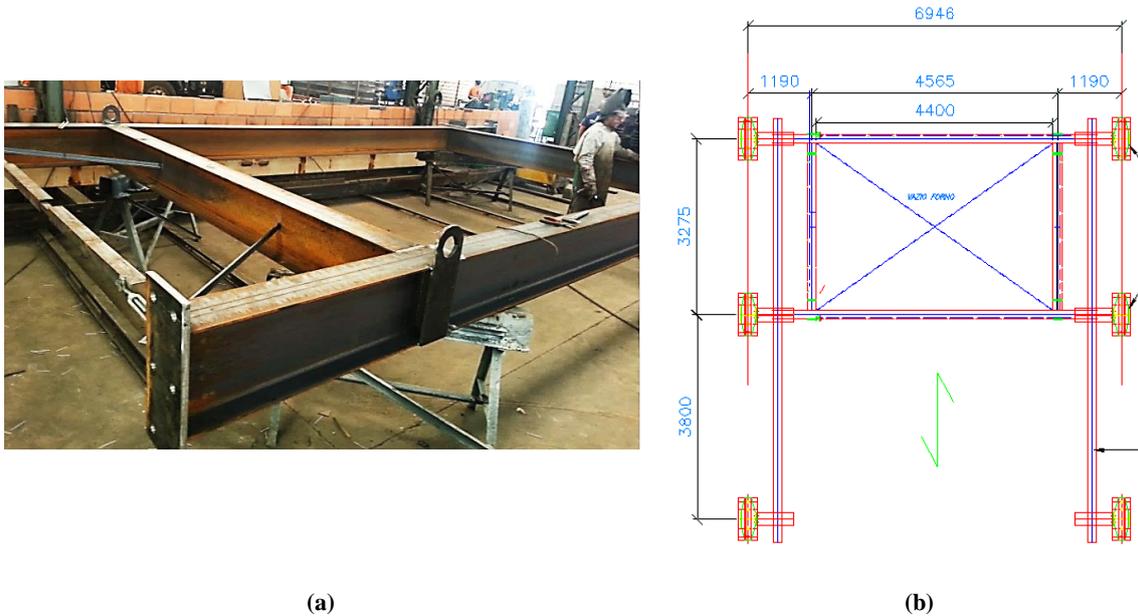


Figura 3.28: Quadro de apoio: (a) Fabricação; (b) Layout da estrutura de apoio e sistema de remoção.



Figura 3.29: Visão Geral do Equipamento de Ensaio com viga de rolamento para remoção do quadro de apoio.



Figura 3.30: Posicionamento do quadro: (a) Durante o ensaio; (b) Finalização com extinção das chamas residuais.

O quadro foi construído com perfis de aço (W310 x 38,7), que receberam isolamento térmico, conforme ilustrado Figura 3.31 (a). O isolamento foi realizado com módulos de manta de fibra cerâmica preparados com as dimensões necessárias para preencher o perfil. Os módulos foram posicionados paralelamente, Figura 30 (b), e fixados ao perfil com a utilização de silicato de cálcio.

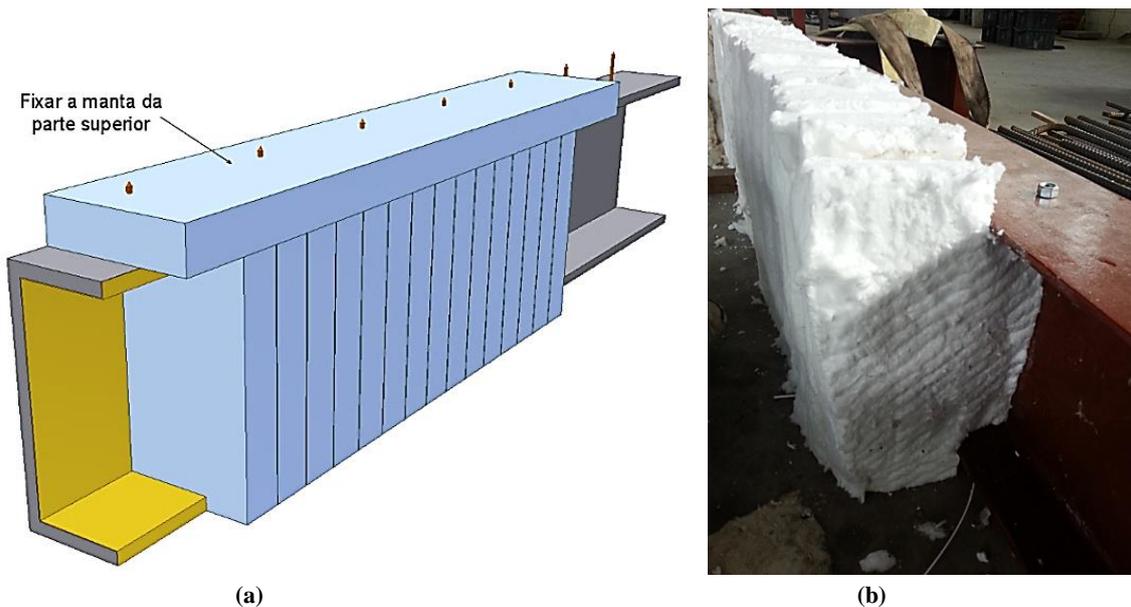


Figura 3.31: Revestimento do quadro de apoio: (a) layout proposto; (b) execução do isolamento.

Para o fechamento e isolamento do forno foi montada uma caixa ao redor das vigas. A caixa foi preparada com a composição de uma camada de placas de compensado (face externa), uma camada de chapa de gesso (Knauf Standard) e uma camada de manta cerâmica (face interna), com os procedimentos mostrados na sequência de imagens da Figura 3.32. Na Figura 3.33 apresenta-se o posicionamento do isolamento ao redor e sobre as vigas na parte superior do forno.



Figura 3.32: Etapas de montagem da estrutura de isolamento.



Figura 3.33: Posicionamentos das placas isolantes ao redor das vigas para fechamento do forno.

3.5.2.3. *Ensaios com elementos sem tratamento preservantes*

Foram realizados dois ensaios para avaliação da seção transversal residual e determinação da taxa de carbonização para as espécies de madeira *Eucalyptus* (Lyptus®) e *Pinus*. Em cada ensaio dois elementos estruturais de cada espécie foram analisados e os queimadores foram desligados quando o tempo estabelecido foi alcançado.

Como observado por Schaffer (1967) e Yang et.al (2009.b), a degradação térmica imediatamente depois de iniciada a carbonização foi maior e, com o avanço da camada carbonizada, a taxa de carbonização tende a um valor constante. A espessura de camada carbonizada formada na parte externa do elemento protege o núcleo da seção, retardando o avanço do fluxo de calor.

Com a finalidade de avaliar a influência do tempo de exposição ao fogo, no primeiro teste os queimadores permaneceram ligados durante 32 minutos, enquanto no segundo teste 40 minutos. Entre desligar os queimadores, desconectar os termopares, remover o quadro da parte superior do forno e extinguir as chamas residuais, foi contabilizado um tempo inferior a 5 minutos. O resfriamento das vigas foi realizado com jato de água, como mostrado na Figura 3.34.

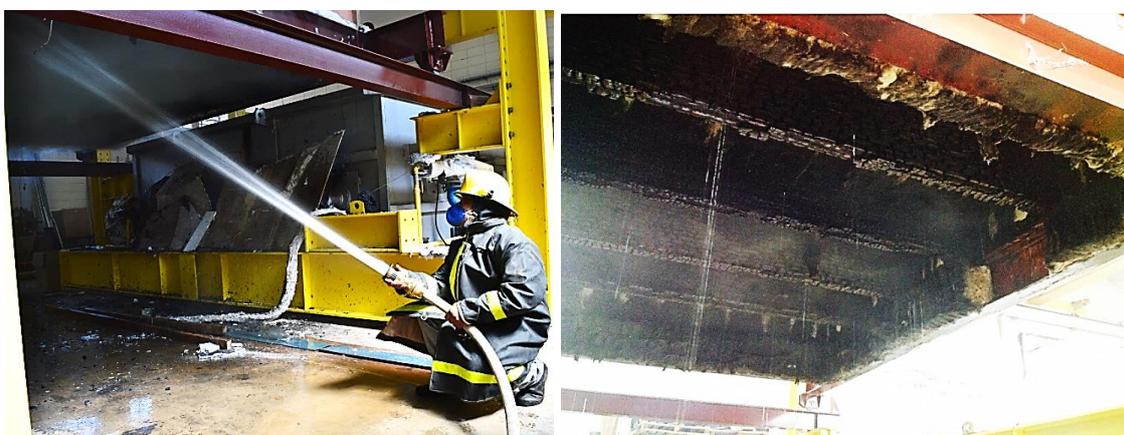


Figura 3.34: Processo de resfriamento das vigas imediatamente após o ensaio.

De acordo com os pesquisadores dos laboratórios da Suíça e da Suécia, uma duração, no máximo, de dez minutos é aceitável para este tipo e complexidade de ensaio, sem prejudicar os resultados para a determinação da camada carbonizada.

Para a determinação da seção transversal remanescente, os elementos depois de carbonizados foram cortados em cinco regiões, como mostrado na Figura 3.35. Cada corte deu origem a duas faces, por exemplo, V-2-1 e V-3-2. No total, seis seções transversais foram avaliadas para cada elemento. As regiões V-1 e V-6 são o limite entre o vão livre (no interior do forno) e os apoios no quadro, portanto, não foram

expostas ao fogo, como pode ser observado na Figura 3.36. As demais regiões foram utilizadas para a avaliação da carbonização.



Figura 3.35: Layout dos cortes realizados para determinação da seção transversal residual.



Figura 3.36: Preparação das seções para avaliação da carbonização.



Figura 3.37: Avaliação da seção transversal residual.

A avaliação de cada seção foi realizada pelas medidas da seção transversal residual, ou seja, desconsiderando a camada carbonizada, como mostrado na Figura 3.37. A seção transversal remanescente dos elementos foi determinada pela média das medidas realizadas.

Nas imagens que se seguem, Figura 3.38 a Figura 3.45, são apresentados os diagramas de evolução temporal da temperatura no interior do elemento, registradas pelos termopares localizados nos pontos A, B, C, D, E, E1. O ponto E1 localiza-se em profundidade igual ao ponto E, entretanto foi posicionado em outra seção como foi comentado anteriormente. São também ilustradas as seções residuais de cada elemento (dimensões em mm) determinadas após o ensaio, com a camada carbonizada representada pela região hachurada.

De acordo com EN 1995-1-2: 2004, a posição da camada carbonizada pode ser considerada a posição da isotérmica de 300 °C. Portanto, os pontos de leitura dos termopares com registro em torno de 300 °C indicam a carbonização da região.

Na Figura 3.38 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus, identificado como P3, exposto ao fogo durante 32 minutos. As temperaturas máximas registradas ocorreram para os termopares C3 e E, com leituras em torno de 100 °C. O termopar C1 apresentou defeito e suas leituras foram desconsideradas. Os demais pontos (C2, D, A, B) registraram temperaturas em torno de 30 °C, e como pode ser observado pela ilustração da seção transversal estavam localizados na área que permaneceu intacta.

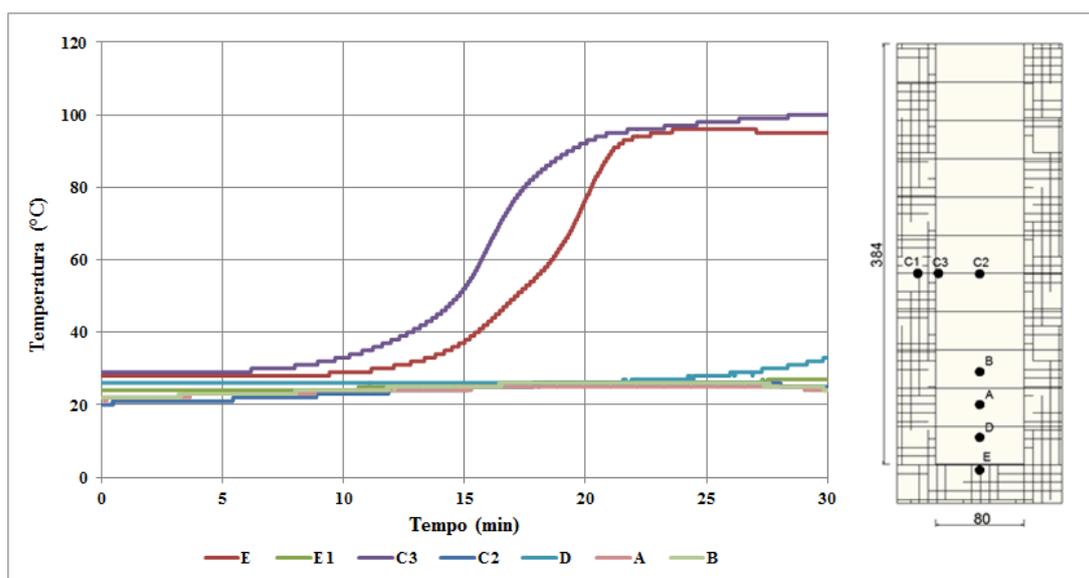


Figura 3.38: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P3.

Na Figura 3.39 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus, identificado como P6, exposto ao fogo durante 32 minutos. O ponto C1

apresentou interferências durante a leitura devido a mau contato no sistema de aquisição de dados. As temperaturas máximas registradas ocorreram para os termopares E e E1, com leituras em torno de 300 °C. O ponto C3 registrou máxima em torno de 125 °C, enquanto o ponto D apresentou temperatura igual a 50 °C, ao final do teste. Os demais pontos (C2, A, B) registraram temperaturas em torno de 30 °C, e como pode ser observado pela ilustração da seção residual estavam localizados na área que permaneceu intacta.

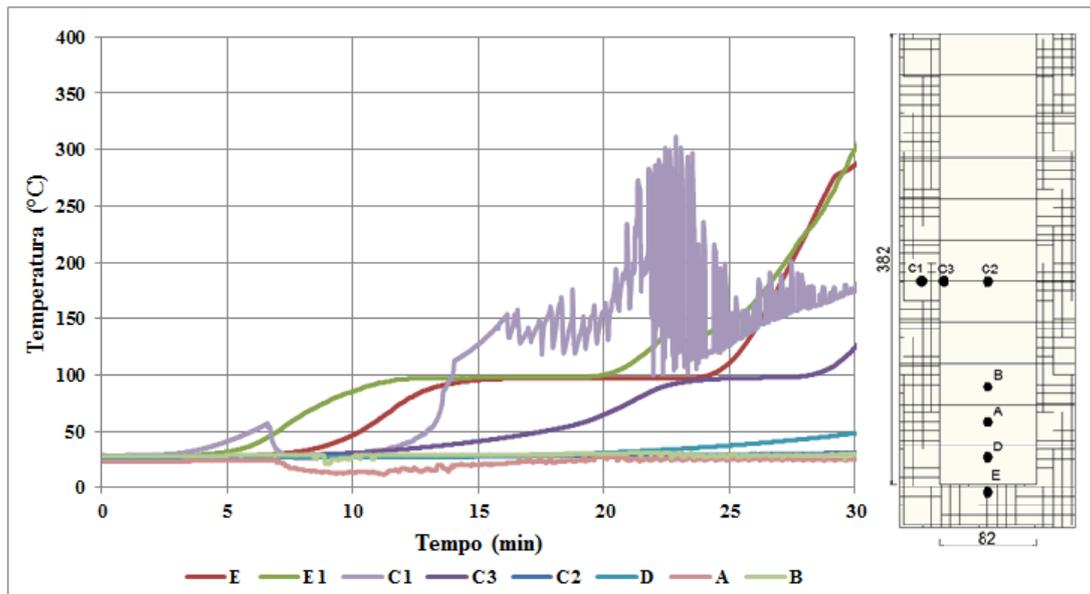


Figura 3.39: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P6.

Na Figura 3.40 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus[®], identificado como L6, exposto ao fogo durante 32 minutos. Os pontos C1 e B apresentaram interferências durante a leitura devido à interferência no sistema de aquisição de dados. As leituras dos pontos A e D foram desconsideradas devido a erro na conexão dos termopares. As temperaturas máximas registradas ocorreram para os termopares E e C1, com leituras em torno de 150 °C. O ponto E1 registrou máxima em torno de 100 °C. Os demais pontos (C2, B) registraram temperaturas em torno de 25 °C.

Na Figura 3.41 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus[®], identificado como L5, exposto ao fogo durante 32 minutos. Os pontos A, B, C1 apresentaram interferências durante a leitura devido a algum mau contato no sistema de aquisição de dados. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C1, com leituras em torno de 225 °C. Os pontos E e E1 registraram temperaturas em torno de 90 °C. A leitura para o ponto C3 registrada ao final do ensaio apresentou temperatura em torno de 75 °C. E nos demais pontos (C3, D, A, B), as temperaturas registradas não foram superiores a 30 °C.

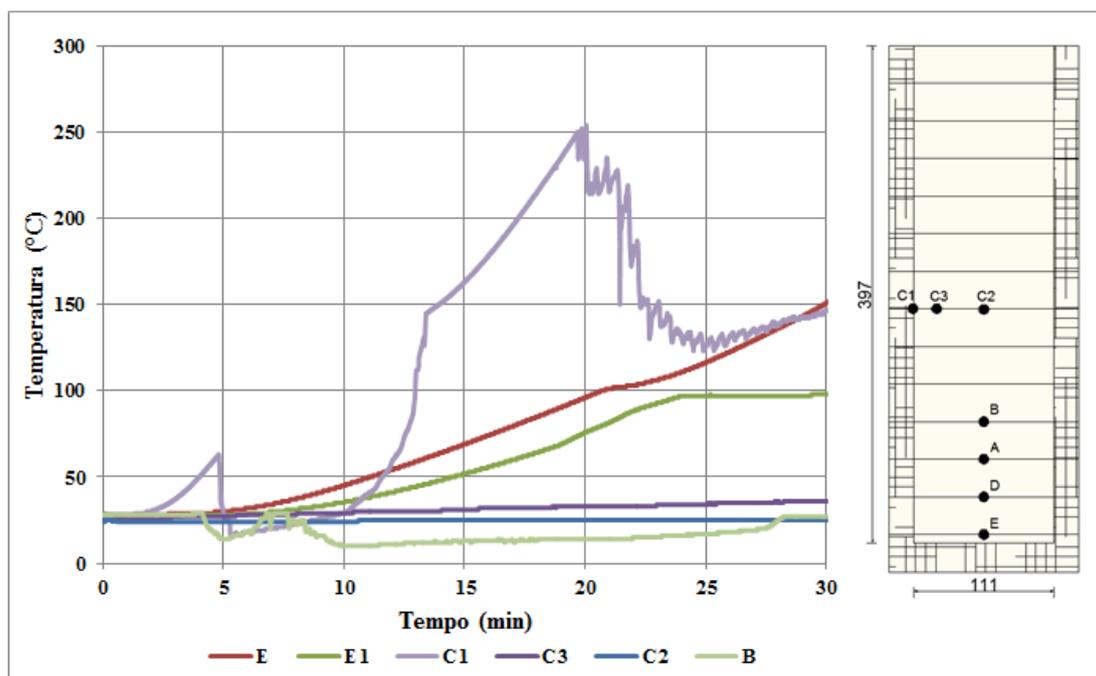


Figura 3.40: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L6.

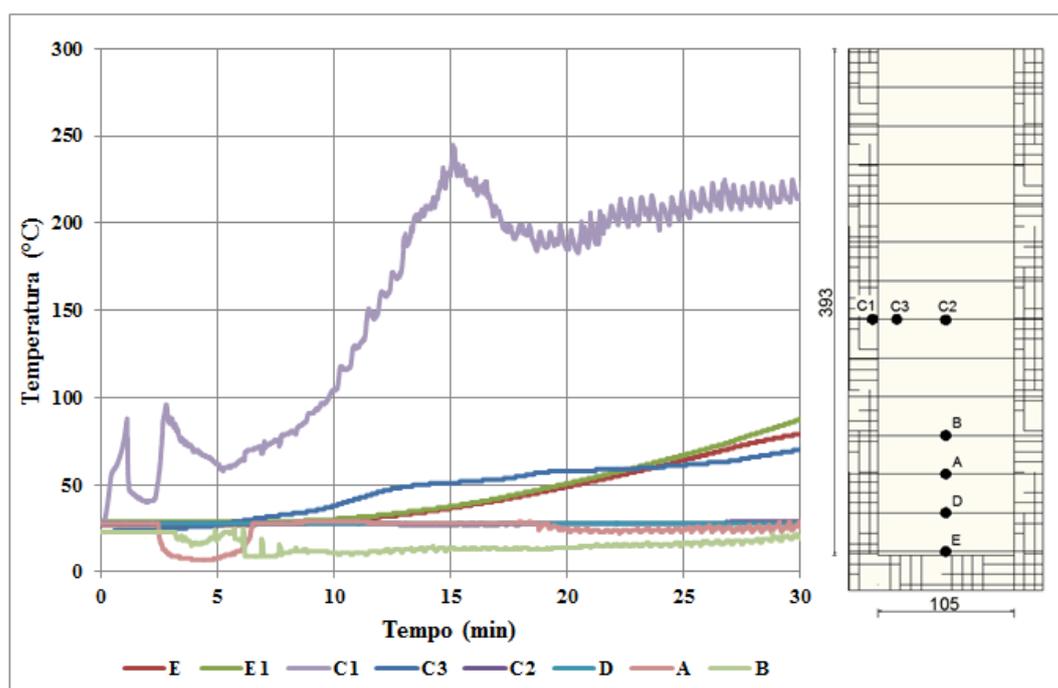


Figura 3.41: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L5.

Na Figura 3.42 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus, identificado como P8, exposto ao fogo durante 40 minutos. As temperaturas máximas registradas ocorreram nos pontos C1 e E1, com leituras em torno de 650 °C. O ponto E registrou temperatura máxima igual a 180 °C. As leituras para os pontos C2 e B registradas ao final do ensaio apresentaram temperaturas em torno de 150 °C. Entretanto, os valores são incoerentes levando em consideração que os pontos A e D, não apresentaram temperaturas superiores a 30 °C.

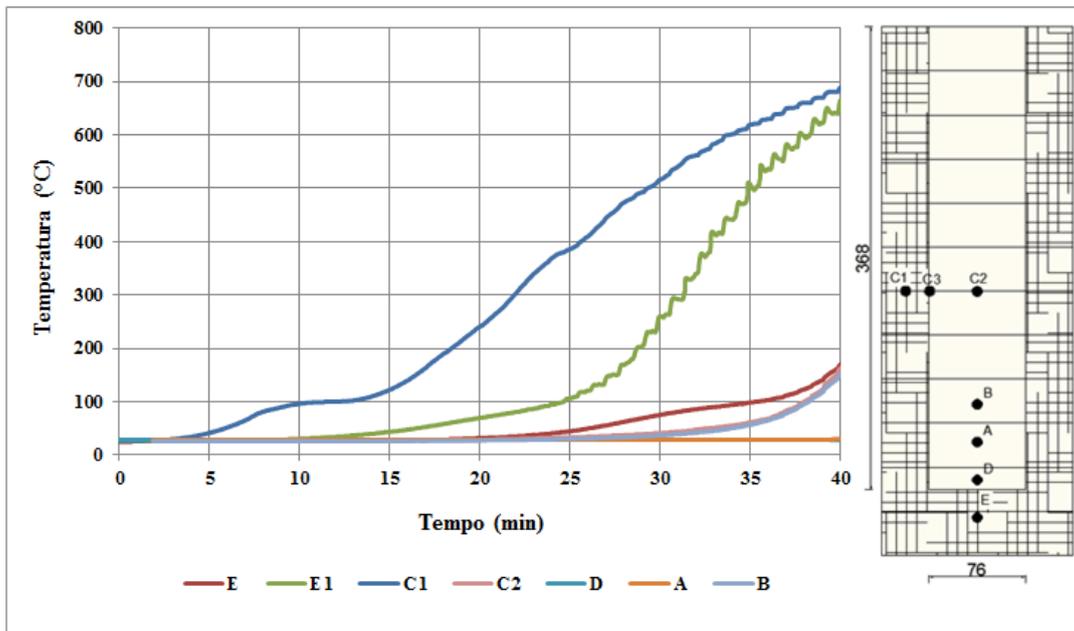


Figura 3.42: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P8.

Na Figura 3.43 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus, identificado como P7, exposto ao fogo durante 40 minutos. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto E, com temperatura em torno de 400 °C. O ponto C3 registrou temperaturas em torno de 140 °C, para os pontos C1 e E1 as temperaturas registradas ao final do ensaio foram de 125 °C. O ponto D apresentou temperatura máxima igual a 100 °C. A leitura para o ponto A registrou temperatura máxima em torno de 35 °C, enquanto nos pontos de leitura C2 e B os resultados foram descartados devido à falha na conexão.

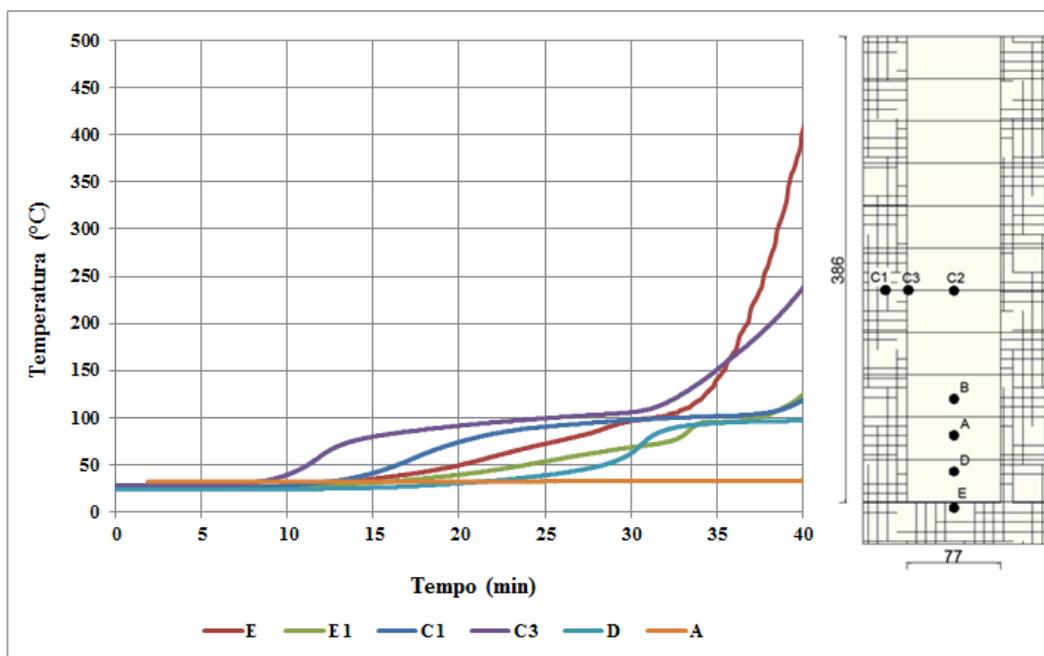


Figura 3.43: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P7.

Na Figura 3.44 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus®, identificado como L8, exposto ao fogo durante 40 minutos. As temperaturas máximas registradas ocorreram nos pontos E e E1, com valores em torno de 100 e 90 °C, respectivamente. O ponto C2 registrou leituras em torno de 50 °C, enquanto no ponto B se registrou temperatura máxima igual a 40 °C. Para os demais pontos (D, A) as temperaturas registradas ao final do ensaio foram em torno de 30 °C. A leitura para o ponto C3 foi descartada devido à falha na conexão.

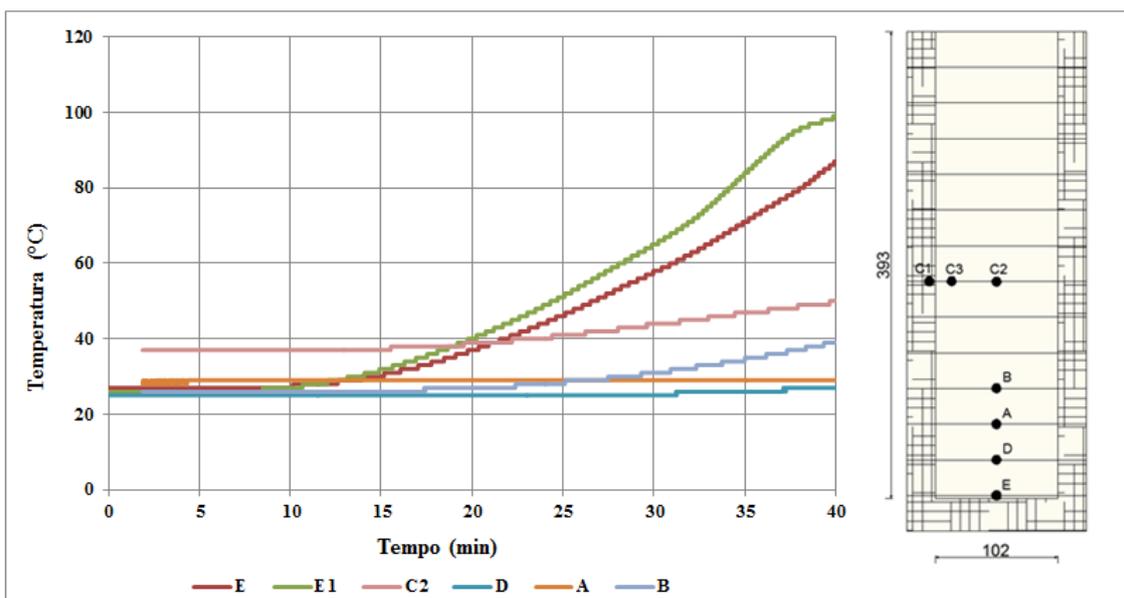


Figura 3.44: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L8.

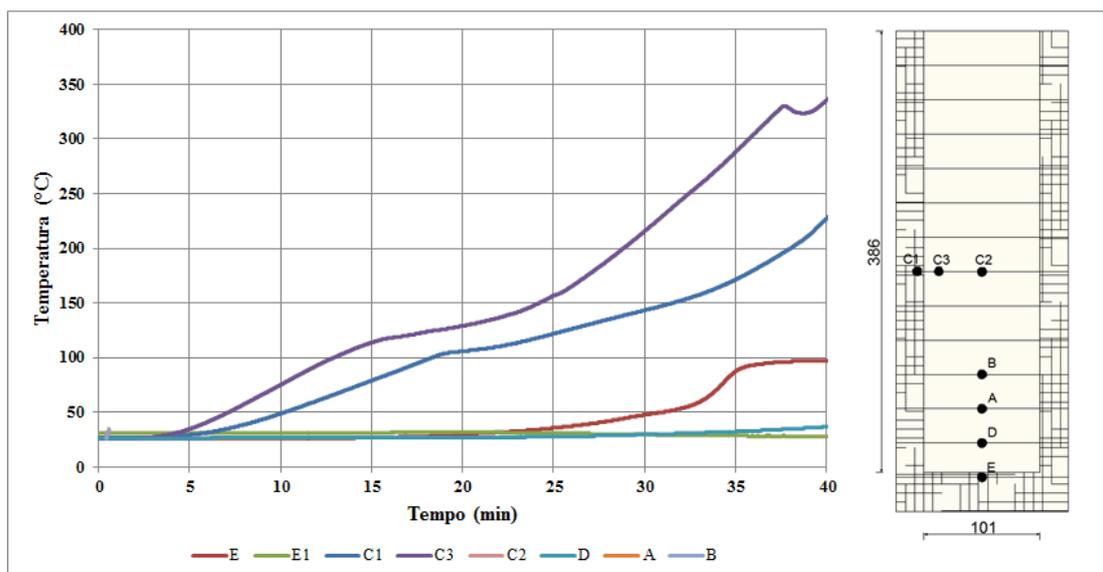


Figura 3.45: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como L4.

Na Figura 3.45 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus[®], identificado como L4, exposto ao fogo durante 40 minutos. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C3, com temperatura em torno de 340 °C. O ponto C1 registrou leituras em torno de 225 °C. O ponto E registrou temperatura máxima igual a 100 °C. Para os demais pontos (D, B, A) as temperaturas registradas não foram superiores a 30 °C.

Durante a exposição ao fogo uma camada carbonizada é formada na parte externa dos elementos de madeira que protege e retarda o fluxo de calor para o interior da seção. Assim sendo, a seção transversal diminui lentamente, e gradualmente, o elemento perde sua capacidade estrutural.

O principal fator de controle no estudo de resistência ao fogo dos elementos estruturais de madeira é a taxa de carbonização. Os parâmetros que afetam a taxa de carbonização têm sido extensivamente estudados. Pesquisas realizadas por Schaffer (1967), White (1988), Njankouo et al. (2004) e Yang et al. (2009.b), indicaram que a densidade da madeira é o principal fator de influência na taxa de carbonização.

No trabalho, as duas espécies de madeira analisadas pertencem a grupos distintos, sendo o *Eucalyptus* (Lyptus[®]) do grupo das folhosas, com densidade média em torno de 743 kg/m³, enquanto o *Pinus* representa o grupo das coníferas, com densidade média em torno de 505 kg/m³.

Na Figura 3.46 pode se observar as seções remanescentes para os elementos de Lyptus[®] e *Pinus*, expostos ao fogo durante 32 minutos, bem como as seções transversais intactas (sem exposição ao fogo). Enquanto o Lyptus apresentou uma redução em relação à largura inicial em torno de 30%, o *Pinus* apresentou uma redução de 47%. Em relação à altura a redução foi de 6% e 8%, respectivamente, para o Lyptus e o *Pinus*.

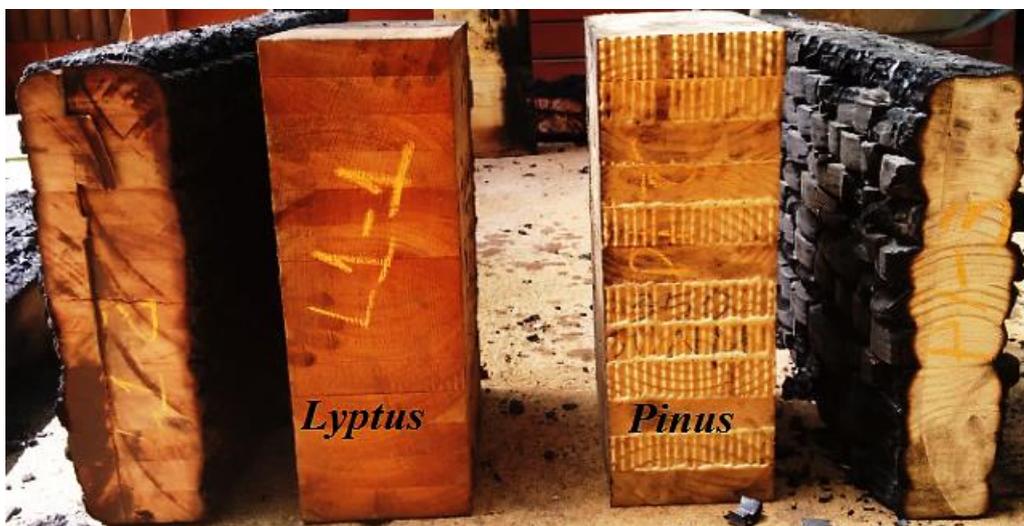


Figura 3.46: Seção remanescente dos elementos de MLC depois de expostos ao fogo por 31 minutos.

Na Tabela 3.11 são apresentadas as seções transversais residuais registradas após a exposição ao fogo para os elementos estruturais de MLC de Pinus e Lyptus®, bem como a espessura da camada carbonizada em relação à largura e a altura e o momento de inércia da seção remanescente. O cálculo do momento de inércia das peças ao final do ensaio foi realizado para uma análise comparativa da redução da seção transversal em relação à densidade da madeira.

Tabela 3.11: Dados obtidos por meio da análise da carbonização dos elementos.

Duração (min)	Madeira	ID	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Momento de Inércia (cm ⁴)
			Largura	Altura	Largura	Altura	
32	Lyptus®	L5	22,6	27,0	104,7	393,0	52979,6
		L6	19,6	23,0	110,8	397,0	57794,5
	Pinus	P3	34,9	35,5	80,1	384,5	37953,2
		P6	34,1	37,6	81,9	382,4	38160,9
40	Lyptus®	L4	24,6	34,2	100,8	385,8	48264,1
		L8	23,9	27,3	102,3	392,7	51588,8
	Pinus	P7	36,6	34,0	76,8	386,0	36824,3
		P8	37,1	44,8	75,8	375,2	33378,8

Como pode ser observado pela Figura 3.47, quanto maior a densidade maior o momento de inércia, ou seja, maior a seção transversal remanescente. O momento de inércia calculado para a seção transversal original resulta 92610 cm⁴. Para as peças de Lyptus® ocorreu uma redução em torno de 45% e para as peças de Pinus a redução foi de 60% para o mesmo tempo de exposição ao fogo.

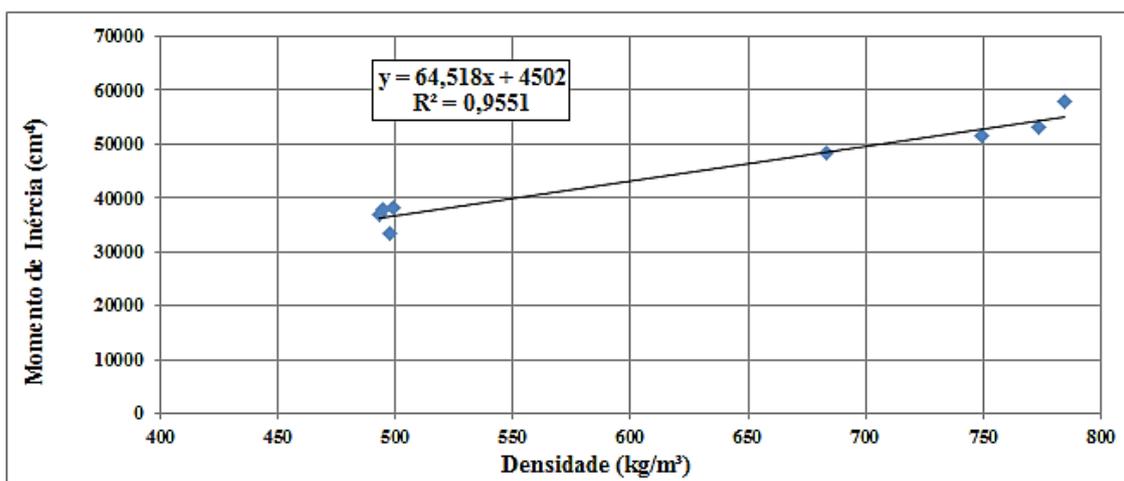


Figura 3.47: Relação entre a densidade e o momento de inércia da seção transversal remanescente.

A partir da espessura da camada carbonizada e o tempo de exposição ao fogo, foram determinadas as taxas de carbonização para cada elemento, com as seguintes expressões:

$$E_L = \frac{(L_1 - L_2)}{2} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$E_H = (H_1 - H_2) \quad \text{Equação 3.6}$$

$$\beta_L = \frac{E_L}{t} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$\beta_H = \frac{E_H}{t} \quad \text{Equação 3.8}$$

Sendo:

- E_L a média da espessura da camada carbonizada para as laterais do elemento;
- L_1 e L_2 são as medidas em relação à largura do elemento antes e após o ensaio;
- E_H é a média da espessura da camada carbonizada na face inferior do elemento;
- H_1 e H_2 são as medidas em relação à altura do elemento antes e após o ensaio;
- β_L é a taxa de carbonização em relação à carbonização das faces laterais do elemento de MLC;
- β_H é a taxa de carbonização em relação à carbonização da face inferior do elemento de MLC.

Os valores determinados para a taxa de carbonização de cada elemento estão apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Valores para a taxa de carbonização dos elementos de MLC em estudo

Duração (min)	Madeira	ID	Densidade (kg/m ³)	Taxa de Carbonização (mm/min)	
				Largura	Altura
32	Lyptus®	L5	773	0,72	0,86
		L6	784	0,62	0,73
		Média		0,67	0,80
	Pinus	P3	495	1,11	1,13
		P6	499	1,08	1,09
		Média		1,10	1,11
40	Lyptus®	L4	683	0,60	0,80
		L8	749	0,59	0,67
		Média		0,59	0,74
	Pinus	P7	493	0,90	0,83
		P8	497	0,93	1,12
		Média		0,91	0,98

Como observado em Schaffer (1967), White (1988) e em Yang et al. (2009b), a taxa de carbonização tende a diminuir com o tempo de exposição ao fogo, pois a camada carbonizada formada nas faces externas do elemento retarda o fluxo de calor para o interior da seção.

Em cada elemento, a média da espessura da camada carbonizada e a taxa de carbonização são maiores nas faces inferiores, do que nas faces laterais. O mesmo aspecto também foi observado em Yang et al. (2009.b) e em Harada et. al (2012). De acordo com Yang et al. (2009.b), este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que as faces inferiores recebem o fluxo de calor primeiro.

3.5.2.4. *Ensaio com elementos tratados com preservantes*

Foi realizado um ensaio para avaliação da influência de tratamentos preservantes na carbonização dos elementos de Madeira Laminada Colada (MLC). Para tanto, os elementos foram tratados por meio de imersão prolongada, com os produtos OSMOGUARD[®] FR 100 (retardantes ao fogo) e MOQ[®] OX 50–CCB–O (preservante ignífugos). O ensaio consistiu na avaliação de quatro vigas de *Pinus* apoiadas no quadro paralelamente, sendo duas tratadas com OSMOGUARD[®] FR 100 e duas com o tratamento preservante MOQ[®] OX 50–CCB–O. Os procedimentos de ensaio adotados foram semelhantes aos elementos sem tratamento, com exposição ao fogo durante 30 minutos.

Na Figura 3.48 a Figura 3.51 são apresentados os diagramas de evolução temporal da temperatura no interior dos elementos, registradas pelos termopares localizados nos pontos A, B, C, D, E. São também ilustradas as seções residuais de cada elemento (dimensões em mm), sendo a camada carbonizada representada pela região hachurada.

Na Figura 3.48 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de *Pinus* tratado com retardantes ao fogo, identificado como P9. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C1, com valor em torno de 460°C. Nos pontos E e C3 foram registradas temperaturas em torno de 60 °C. Para os demais pontos as temperaturas registradas não foram superiores a 40 °C.

Na Figura 3.49 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de *Pinus* tratado com retardantes ao fogo, identificado como P10. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C3, com valor em torno de 650 °C. O ponto C1 apresentou temperaturas em torno de 100 °C. Nos pontos E e E1 foram registradas

temperaturas em torno de 70 °C. Para os demais pontos (C2, D, A, B) as temperaturas registradas não foram superiores a 50 °C.

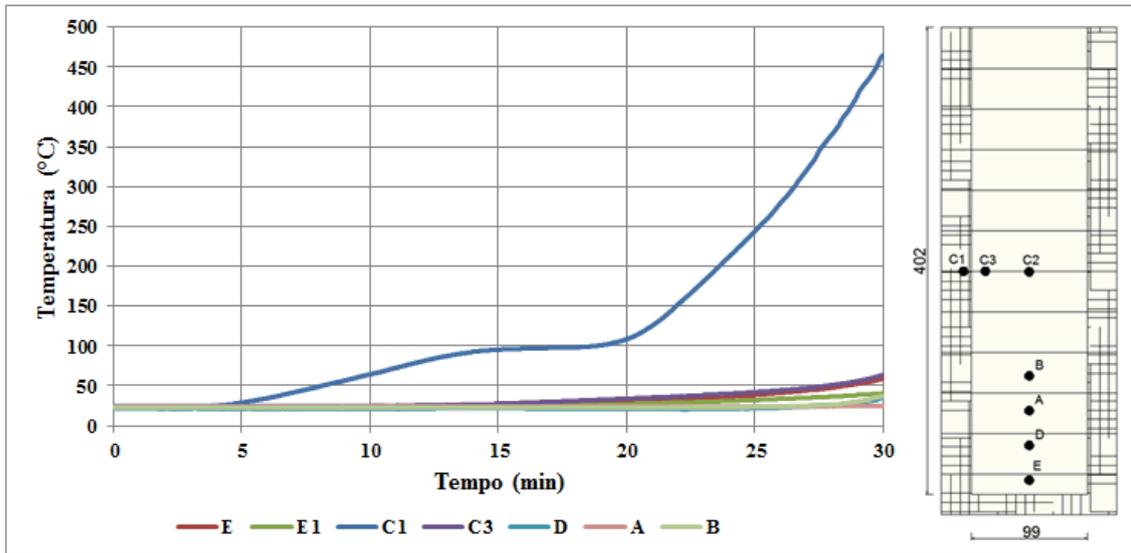


Figura 3.48: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P9 - FR.

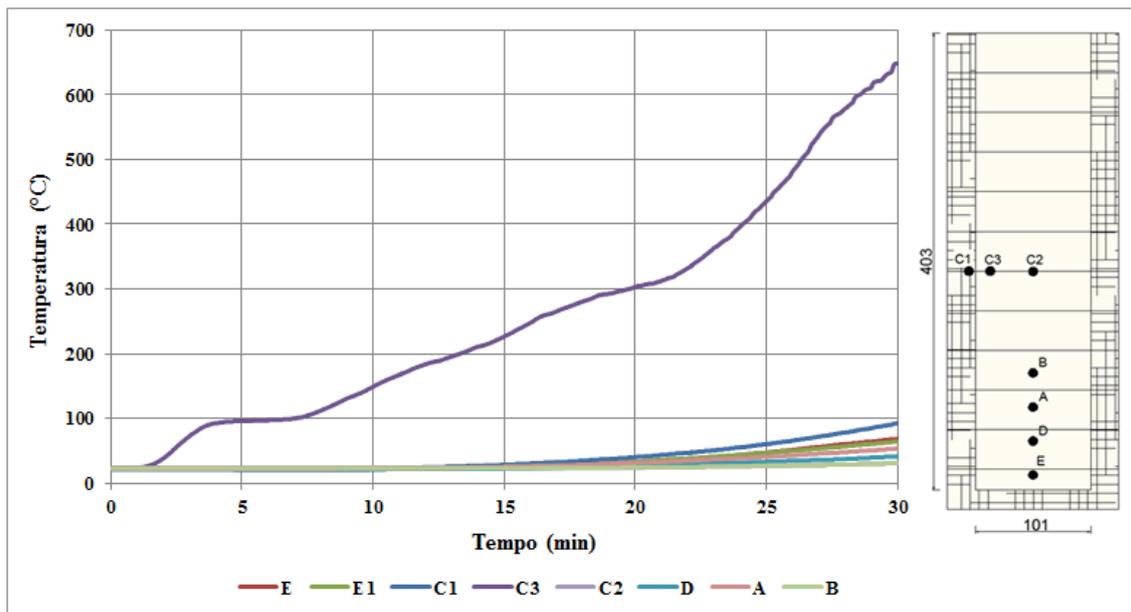


Figura 3.49: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P10 - FR.

Na Figura 3.50 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus tratado com preservantes ignífugos, identificado como P11. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C3, com valor em torno de 330 °C. No ponto C1 foram registradas temperaturas de 97 °C, enquanto que para os pontos E e E1 foram registradas temperaturas em torno de 75 °C. Para os demais pontos (C2, D, A, B) as temperaturas registradas não foram superiores a 40 °C.

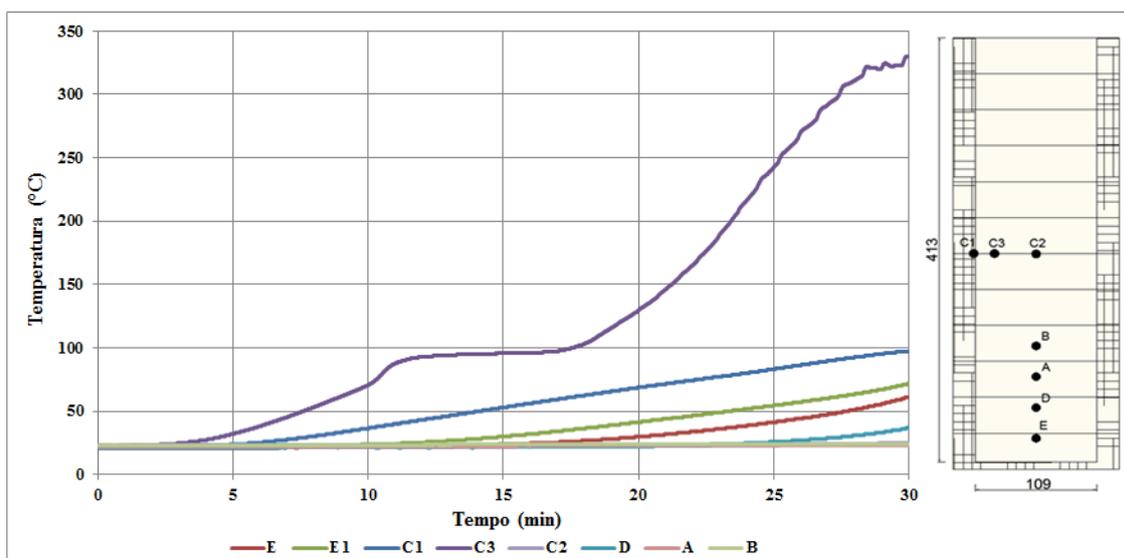


Figura 3.50: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P11 - CCB.

Na Figura 3.51 é apresentada a evolução da temperatura no interior do elemento de Pinus tratado com preservantes ignífugos, identificado como P12. A temperatura máxima registrada ocorreu no ponto C1, com valor em torno de 700 °C. No ponto C3 foram registradas temperaturas máximas de 144 °C, enquanto que nos pontos E e E1 foram registradas temperaturas de 94 e 57°C, respectivamente. Para os demais pontos (C2, D, A, B) as temperaturas registradas não foram superiores a 30 °C.

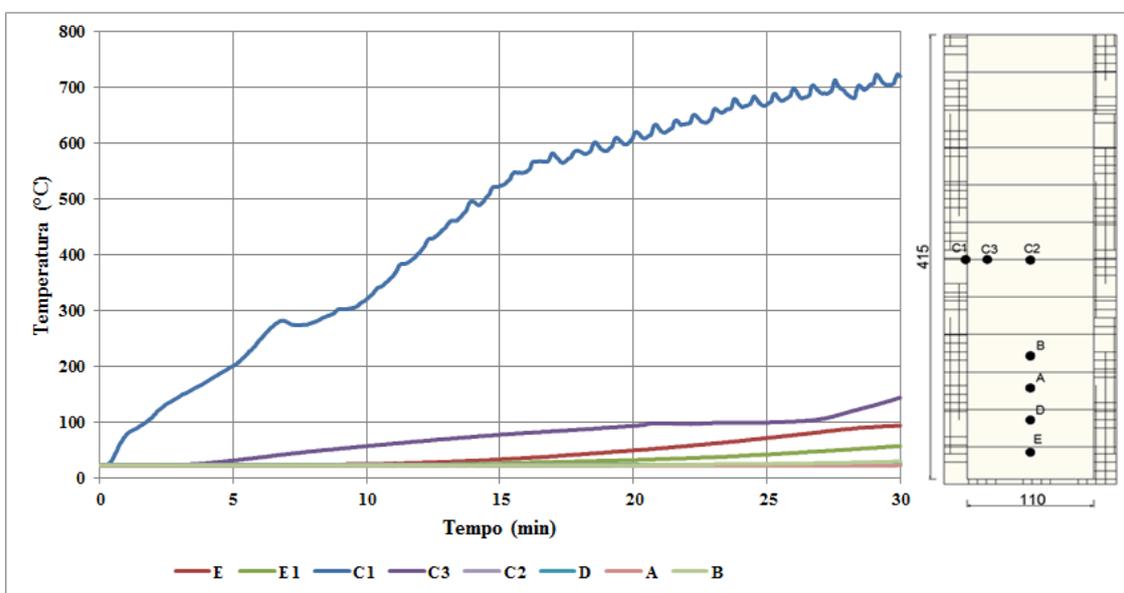


Figura 3.51: Evolução temporal da temperatura no interior do elemento identificado como P12 - CCB.

A avaliação da seção transversal residual foi realizada conforme discutido anteriormente para os elementos estruturais sem tratamentos preservantes. Na Tabela 3.13 são apresentadas as seções transversais residuais registradas após a exposição ao

fogo para os elementos estruturais fabricados com a espécie de madeira Pinus e imersas em tratamento preservantes, bem como a espessura da camada carbonizada em relação à largura e a altura e o momento de inércia da seção remanescente.

Tabela 3.13: Dados obtidos por meio da análise da carbonização dos elementos com tratamentos preservantes.

Duração (min)	Tipo de Tratamento	ID	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Momento de Inércia (mm ⁴)
			Largura	Altura	Largura	Altura	
30	FR 100	P9	25,5	18,5	99,0	401,5	53396
		P10	24,4	17,5	101,3	402,5	55019
	CCB - O	P11	20,6	22,2	108,8	397,8	63725
		P12	19,8	20,5	110,4	399,5	65518

Os valores determinados para a taxa de carbonização dos elementos com aplicação de tratamentos preservantes são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Valores para a taxa de carbonização dos elementos de MLC com tratamentos preservantes.

Duração (min)	Tipo de Tratamento	ID	Densidade (kg/m ³)	Taxa de Carbonização (mm/min)	
				Largura	Altura
30	FR 100	P9	523	0,85	0,62
		P10	524	0,81	0,58
		Média	0,83	0,60	
	CCB - O	P11	504	0,69	0,74
		P12	600	0,66	0,68
		Média	0,67	0,71	

Os elementos imersos em tratamento preservante MOQ[®] OX 50–CCB–O apresentaram valores para a taxa de carbonização nas faces laterais menores do que os elementos nos quais foi aplicado o tratamento retardantes ao fogo OSMOGUARD[®] FR 100. Todavia, os elementos tratados com preservantes ignífugos apresentaram fissuras e rachaduras na face inferior e na seção transversal, como pode ser visto nas imagens da Figura 3.52. A Figura 3.52 (a) apresenta a imagem da face superior do elemento, face não exposta diretamente ao fogo. Entretanto, observam-se fissuras ao longo do comprimento. Na seção transversal apresentada na Figura 3.52 (b), é possível observar fissuras. Por fim, a rachadura ocorrida na face inferior do elemento P12, Figura 3.52 (c), apresentou profundidade de 15 mm. Na Figura 3.53 é possível perceber a diferença na face inferior dos elementos tratados com OSMOGUARD[®] FR 100 e MOQ[®] OX 50–CCB–O.

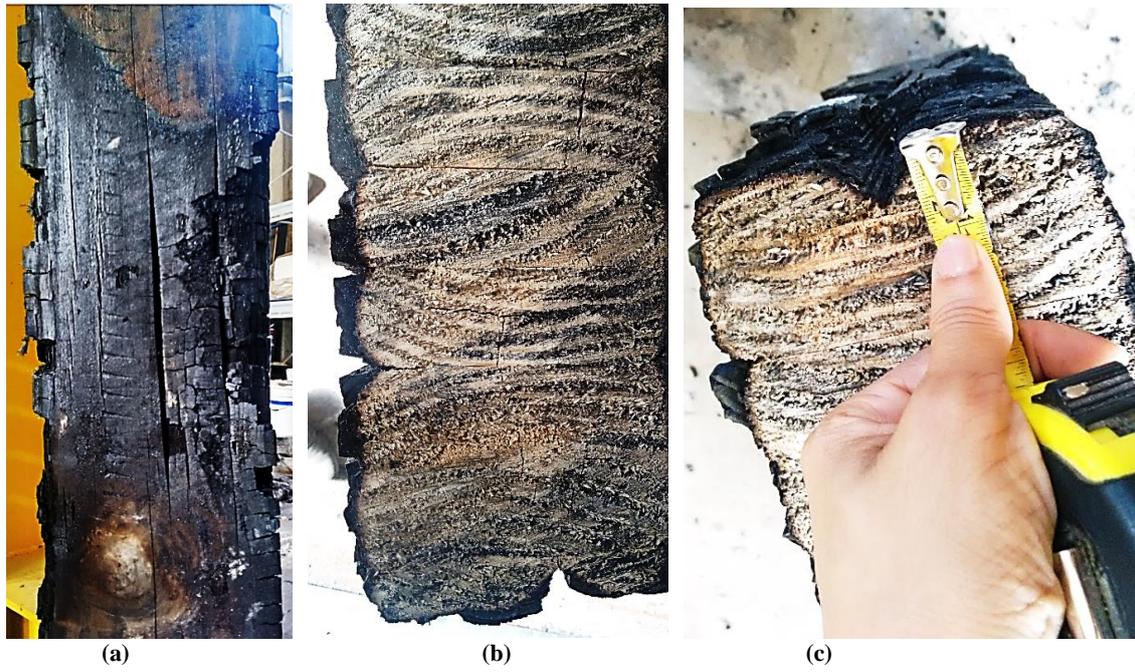


Figura 3.52: Detalhes do elemento tratado com o preservante CCB depois de exposto ao fogo por 30 minutos: (a) face superior, (b) seção transversal; (c) detalhe da rachadura na face inferior.

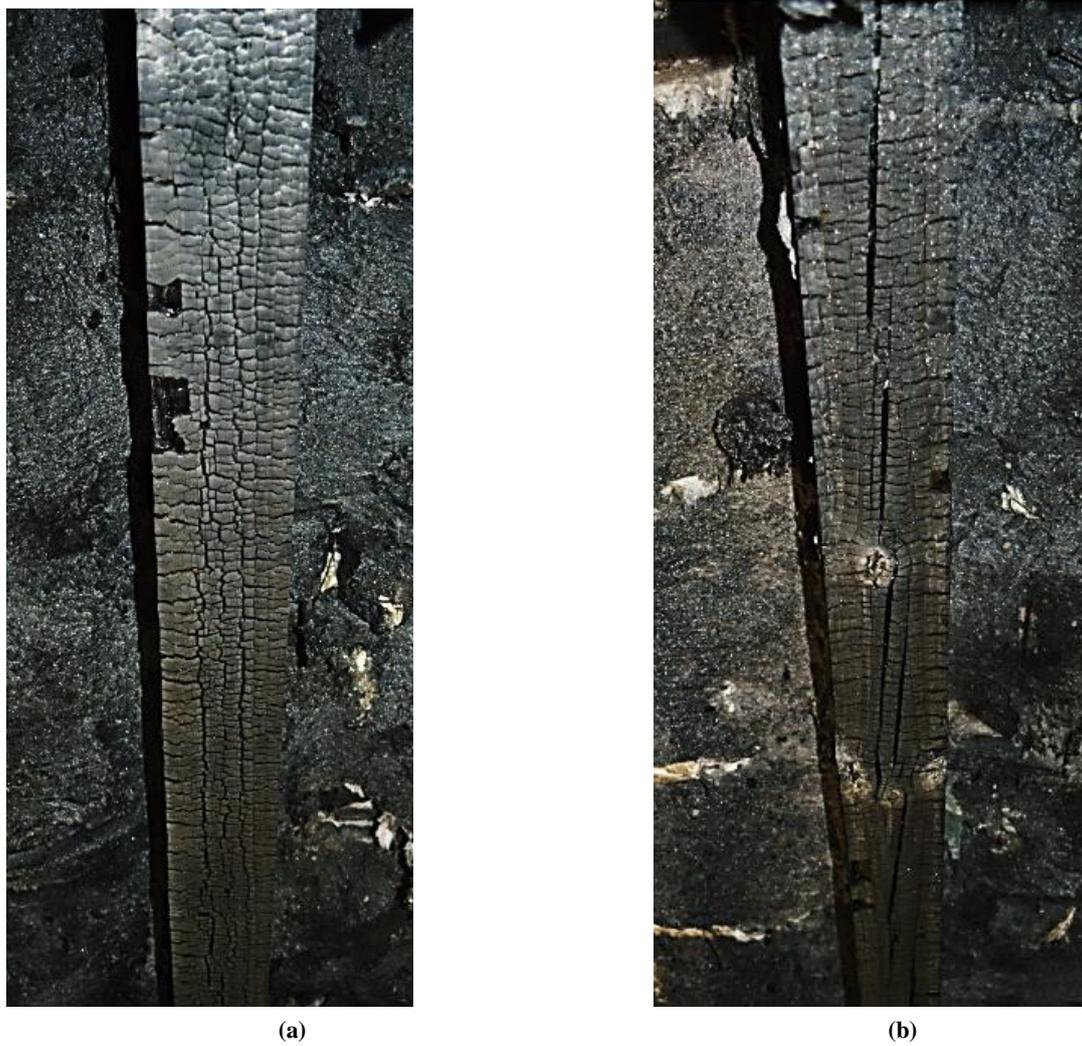


Figura 3.53: Face inferior dos elementos com tratamento: (a) OSMOGUARD® FR 100; (b) MOQ®-CCB

A finalização do ensaio depois de desligados os queimadores foi executada como realizado para os elementos estruturais sem tratamento preservante. Na Figura 3.54 (a) é possível observar que durante a retirada dos elementos sem tratamento há a presença de chamas residuais, enquanto para as vigas tratadas (Figura 3.54.b) as chamas foram cessadas ao desligar a fonte de ignição.



(a)

(b)

Figura 3.54: Retirada dos elementos após o ensaio: (a) sem tratamento; (b) com tratamento.

Na Figura 3.55 e na Figura 3.56 apresentam as seções transversais dos elementos antes e após a exposição ao fogo. Cada seção representa um ensaio, que é indicado pelo tempo de duração da exposição ao fogo (30 ou 40 minutos) ou pelo tipo de tratamento que foi aplicado (MOQ[®] OX 50-CCB-O ou OSMOGUARD[®] FR 100). Pode se observar a influência significativa da densidade em relação à carbonização dos elementos, conseqüentemente na seção transversal residual.

Para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio, levando em consideração que a taxa de carbonização tende a um valor constante ao longo do período de exposição ao fogo, sugere se adotar para o dimensionamento de estruturas de madeira os valores determinados nos ensaios com tempo de aquecimento de 40 minutos.

Portanto, para elementos de Lyptus[®] a taxa de carbonização sendo igual a 0,67 mm/min, e para o Pinus sendo igual a 0,95 mm/min. Para diminuir a velocidade da carbonização dos elementos fabricados com madeira da espécie Pinus, aconselha se o uso do produto retardantes de chamas OSMOGUARD[®] FR 100, considerando no dimensionamento a taxa de carbonização sendo igual a 0,72 mm/min.

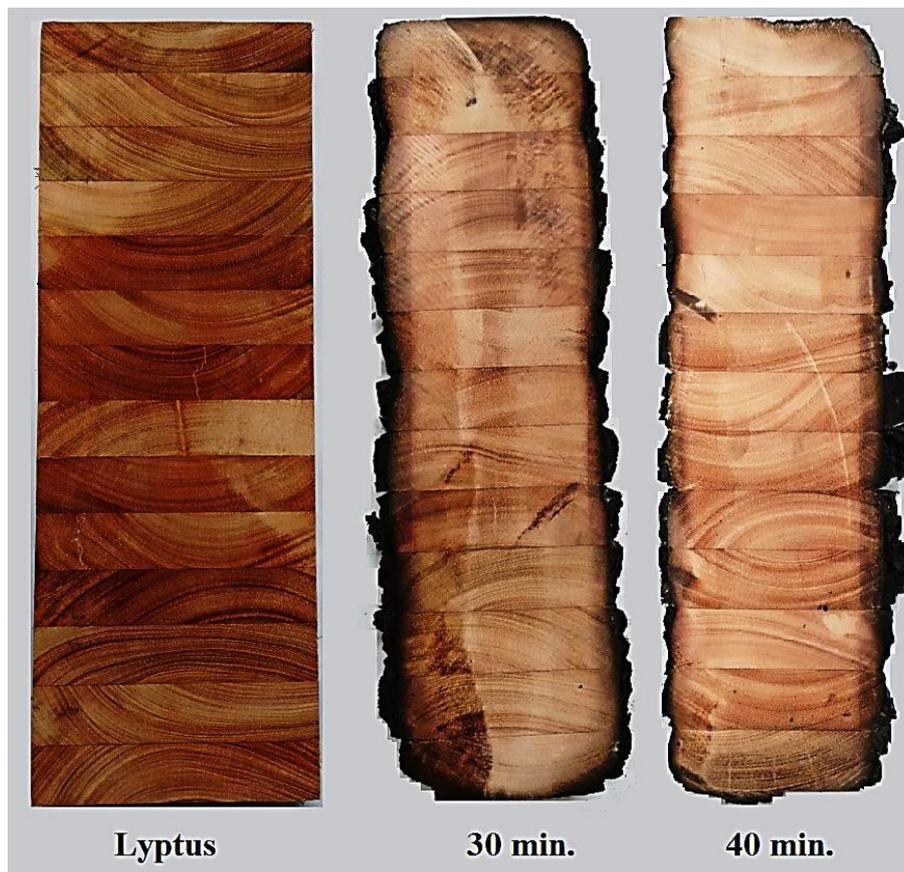


Figura 3.55: Seção transversal dos elementos preparados com madeira de Lyptus

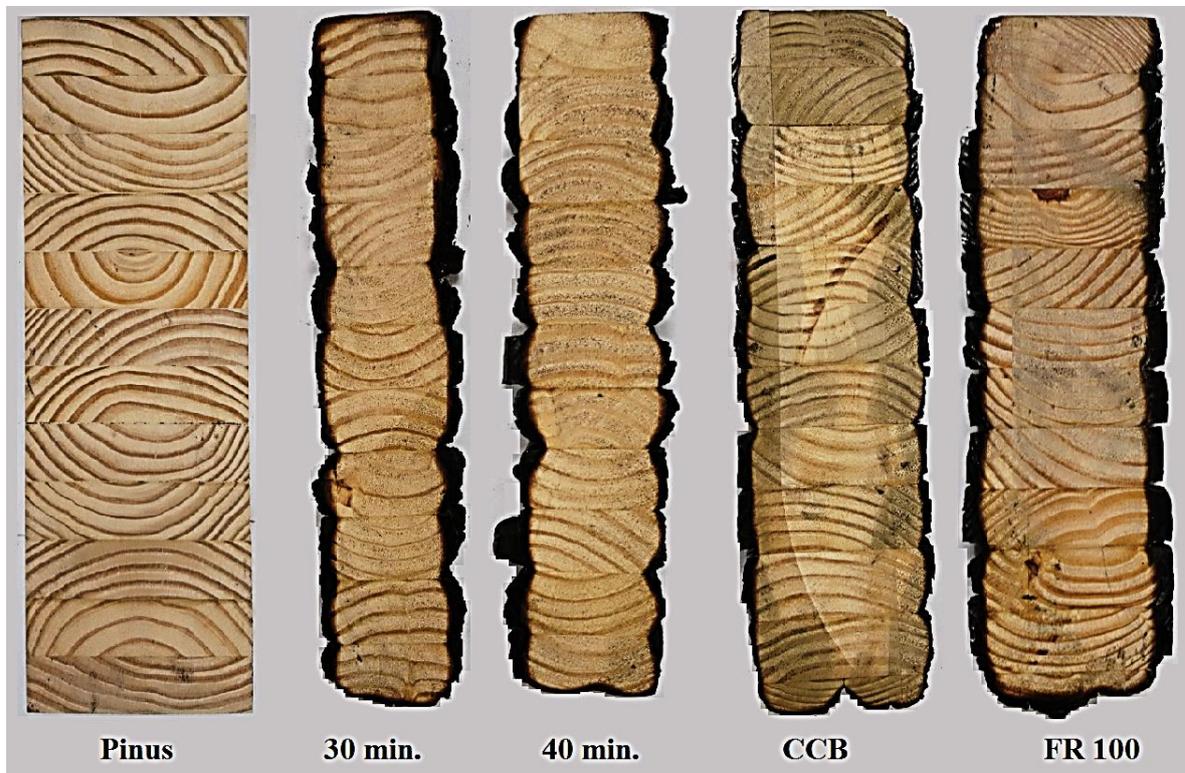


Figura 3.56: Seção transversal dos elementos preparados com madeira de Pinus

3.5.3. Ensaios Termoestruturais

Ensaios termoestruturais foram realizados para a avaliação da resistência ao fogo dos elementos de madeira da espécie *Eucalyptus* (Lyptus®) e *Pinus*. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga concentrada no meio do vão e exposição ao fogo em três faces do elemento sob a curva de incêndio-padrão ISO 834:1999.

3.5.3.1. Montagem do Ensaio

O elemento em estudo foi posicionado no interior do forno e apoiado na parte externa nos pórticos adjacentes ao equipamento, conforme mostrado na Figura 3.57. O vão livre do elemento (entre os apoios) foi igual a 5100 mm, entretanto o vão exposto ao fogo (interior do forno) foi de 4000 mm.

A face superior do elemento foi revestida com manta cerâmica para isolamento térmico e proteção dos termopares (Figura 3.58). As demais faces (face inferior e faces laterais) ficaram expostas ao fogo.



Figura 3.57: Posicionamento da viga no interior do forno: (a) visão geral; (b) detalhe do apoio nos consoles.



Figura 3.58: Isolamento da face superior do elemento.

Aplicou-se uma força concentrada no meio do vão com a utilização de um cilindro hidráulico marca ENERPAC, modelo RC 1012, com capacidade máxima de 10

toneladas e curso de 304 mm, Figura 3.59 (a). Ao cilindro foi acoplado um prolongador com comprimento de 500 mm, revestido com manta cerâmica para utilização no interior do forno, como mostrado Figura 3.59 (b). Utilizou-se uma célula de carga como transdutor de medição da força aplicada, sendo posicionada na face superior do suporte do cilindro hidráulico, como mostrado na Figura 3.59 (c). As leituras foram registradas no sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000.

Para acompanhar o deslocamento ocorrido no meio do vão livre foram utilizados transdutores de fio marca VISHAY, modelo CDS – 50, com curso de 127 cm, Figura 3.60 (a). Foram utilizados dois transdutores posicionados há 200 mm do meio do vão devido a localização do cilindro hidráulico, conforme pode ser observado na Figura 3.60 (b). Ao transdutor de deslocamento foi acoplado um cabo termopar (Figura 3.61. a), sendo o fio do cabo termopar conectado a viga no interior do forno por meio de um gancho, conforme mostrado na Figura 3.61 (b).



Figura 3.59: Sistema de aplicação de carga: (a) cilindro hidráulico; (b) prolongador isolado; (c) célula de carga.



Figura 3.60: Sistema de leitura de deformações: (a) transdutor de fio; (b) posicionamento de transdutores.

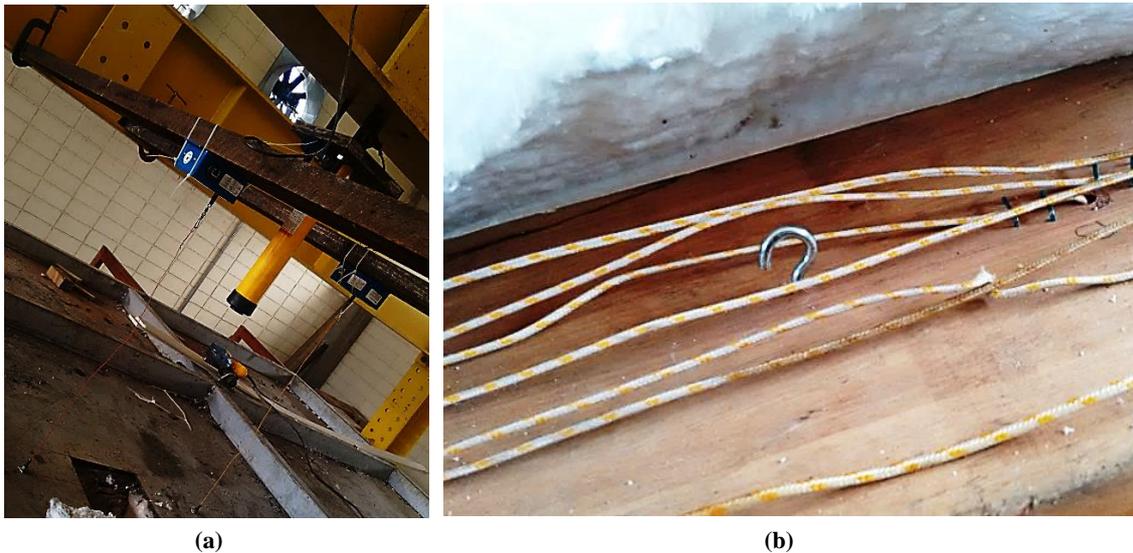


Figura 3.61: Sistema de leitura de deformações: (a) Posicionamento dos transdutores; (b) gancho para fixação dos fios para controle do deslocamento da viga.

Na Figura 3.62 é ilustrada a montagem dos ensaios de flexão a três pontos no interior do forno horizontal. A vedação da parte superior do forno foi realizada com a instalação da tampa do forno, na qual foram realizadas furações para a passagem do prolongador acoplado ao cilindro hidráulico e dos cabos conectados aos transdutores de deslocamento.

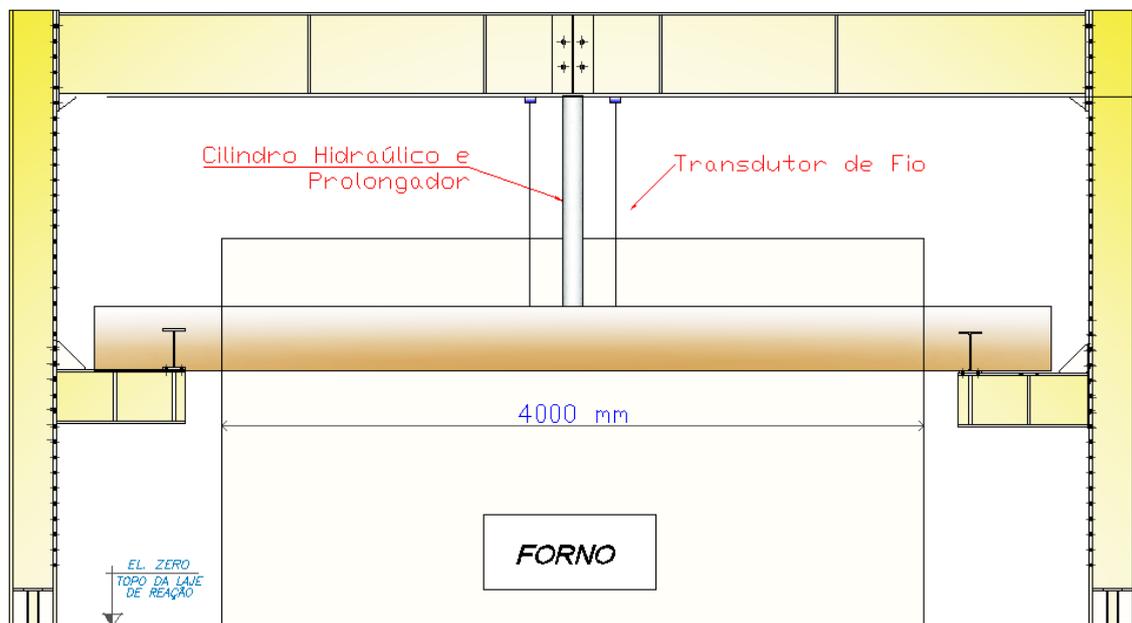


Figura 3.62: Layout da montagem do ensaio com aplicação de carga (flexão à três pontos).

As vedações nas laterais do forno foram montadas de acordo com as dimensões da seção transversal do elemento em estudo, conforme mostrado na Figura 3.63. Foram confeccionadas placas de compensado revestidas com uma camada de gesso Standard e duas camadas de manta cerâmica.

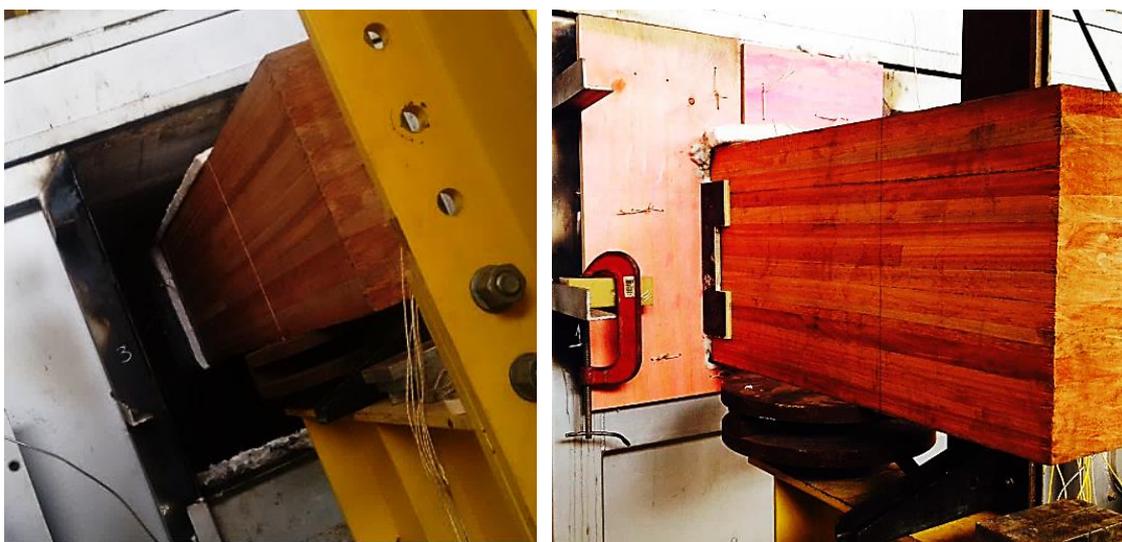


Figura 3.63: Isolamento nas laterais do forno horizontal.

O controle da temperatura no interior dos elementos foi realizado por meio de termopares do Tipo K posicionados ao longo do comprimento em três seções, como ilustrado na Figura 3.64 (a). Para a seção no meio do vão foram utilizados sete termopares ao longo da altura e largura (Figura 3.64. b) e nas demais seções foram utilizadas seis termopares (Figura 3.64. c). A quantidade de termopares foi estipulada de acordo com a disponibilidade de sensores de leitura do equipamento e, sendo assim, não foi necessária à utilização dos sensores adicionais disponíveis no sistema de aquisição de dados System 5000.

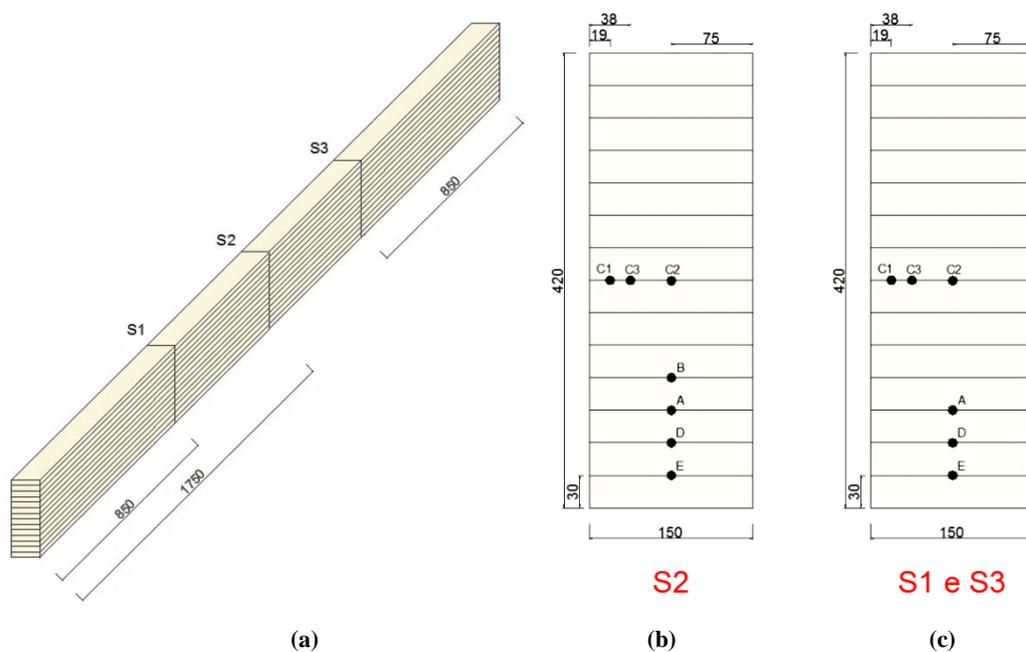


Figura 3.64: Layout de posicionamento dos termopares. Dimensões em mm.

Para os ensaios de avaliação da resistência ao fogo com a metodologia proposta, não foi possível retirar as vigas e realizar o resfriamento em um curto período de tempo. Portanto, não foi avaliada a carbonização das espécies de madeira.

3.5.3.2. *Elementos de estudo*

Os elementos utilizados para a análise da resistência ao fogo de vigas de Madeira Laminada Colada foram preparados com comprimento igual a 6000 mm e seção transversal de 150 mm por 420 mm.

A proposta inicial do trabalho era realizar os ensaios com a disposição dos elementos conforme os testes para avaliação da carbonização, Figura 3.21, ou seja, elementos com comprimento de 3500 mm. No entanto, devido à complexidade do ensaio e com a finalidade em garantir a segurança e integridade do equipamento do ensaio, então, adotou-se a metodologia discutida no item anterior e ilustrada na Figura 3.62.

Os elementos foram preparados pela construtora com comprimento igual a 3500 mm. Sendo necessário executar uma ligação para prolongar o comprimento da viga. Os procedimentos e cálculos para o dimensionamento foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM). A ligação adotada foi uma conexão circular para resistência a momento com pinos metálicos, como mostrado na Figura 3.65. Informações sobre o dimensionamento da ligação encontram-se em anexo.



Figura 3.65: Detalhes da ligação circular resistente à momento.

Inicialmente, na temperatura ambiente, foram realizados ensaios de flexão a três pontos para determinação do módulo de elasticidade (MOE), conforme Figura 3.66. Os valores para os módulos de elasticidade determinados foram de 7816 MPa e 5815 MPa, respectivamente, para as vigas de Lyptus e Pinus.



Figura 3.66: Ensaio de flexão a três pontos em elementos estruturais.

3.5.3.3. Ensaio Termoestrutural

Foram realizados dois ensaios em temperaturas elevadas e aplicação de uma força concentrada no meio do vão. O primeiro ensaio consistiu em avaliar uma viga da espécie de madeira *Eucalyptus* (Lyptus[®]), sendo aplicada uma carga concentrada de 25 kN. O segundo ensaio foi realizado com a viga da espécie de madeira *Pinus*, sendo aplicada uma carga concentrada de 23 kN.

A Figura 3.67.a mostra o interior do forno durante o ensaio com queimadores ligados e conforme a Figura 3.67.b no instante seguinte ao serem desligados os queimadores, na qual é possível ver chamas residuais .

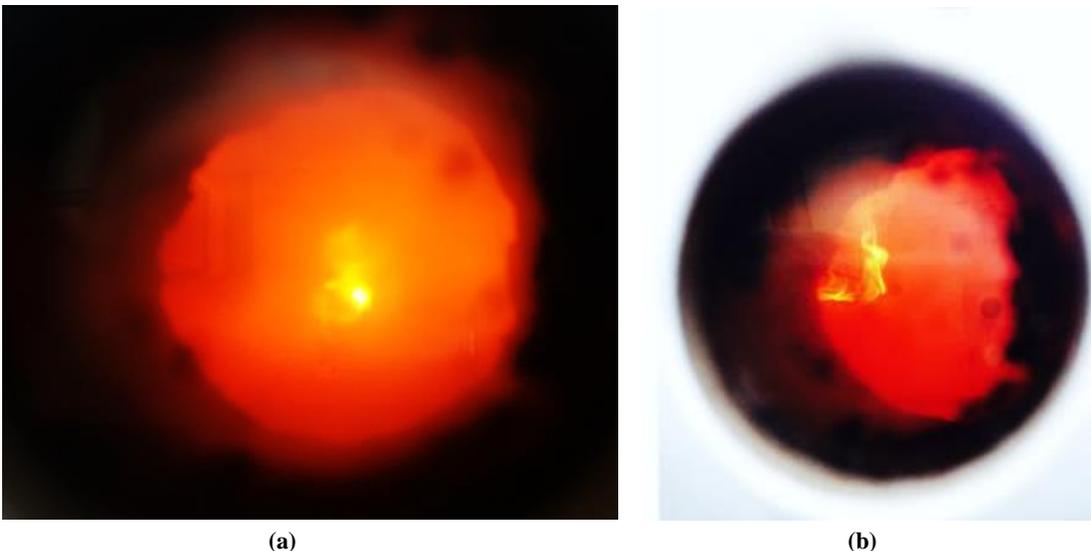


Figura 3.67: Interior do forno (a) Queimadores ligados; (b) Queimadores desligados após o ensaio.

Os procedimentos para a realização dos ensaios seguiram as diretrizes da ISO 834-1: 1999. Inicialmente, a carga foi aplicada e os deslocamentos iniciais registrados, sendo igual a 9 e 22 mm, para as vigas de Lyptus® e Pinus, respectivamente. Depois de estabilizado o carregamento iniciou-se o teste térmico. A carga foi mantida constante ao longo de todo o ensaio.

O critério de parada do ensaio se deu com base na flecha máxima permitida no estado limite de serviço, de acordo com a PN NBR 7190:2013, ou seja, $L/300$, sendo L o vão livre entre os apoios. A flecha máxima, com vistas a interromper o ensaio foi estimada a partir do deslocamento final registrado desconsiderando o deslocamento inicial. Na Tabela 3.15 são apresentados os deslocamentos registrados por meio dos transdutores, bem como o tempo de exposição ao fogo em cada ensaio e a flecha máxima.

Tabela 3.15: Dados obtidos a partir do ensaio em temperaturas elevadas

Madeira	Força Aplicada (kN)	$f = L / 300$ (mm)	Desloc. Inicial (mm)	Duração (min)	Desloc. Final (mm)	Flecha máxima (mm)
Lyptus®	25	17	9	44	27	18
Pinus	23	17	22	26	57	34,5

No ensaio realizado na viga da espécie de madeira de Pinus optou-se por não interromper o ensaio quando alcançada a flecha máxima, pois havia decorrido pouco tempo de ensaio (21 minutos), e com base no conhecimento da carbonização da espécie, optou-se por acompanhar o desempenho estrutural da viga por meio do avanço da temperatura registrada no interior dos elementos, e consequente, redução da seção transversal. Todavia, o ensaio foi encerrado para não causar danos ao equipamento devido ao ligeiro aumento da evolução do deslocamento registrada no centro do vão decorridos 26 minutos de exposição ao fogo.

Na Figura 3.68 observa-se a evolução temporal da flecha no meio do vão, sendo a média dos deslocamentos registrados pelos transdutores, desconsiderando o deslocamento inicial registrado com após a aplicação da força concentrada. A flecha máxima considerada no estado limite de serviço, de acordo com a PN NBR 7190: 2013, para a viga de Pinus foi alcançada decorridos 21 minutos de exposição ao fogo, enquanto que a viga de Lyptus® ficou em exposição ao fogo durante 44 minutos até alcançar o limite estabelecido (reta tracejada em vermelho na imagem da Figura 3.68).

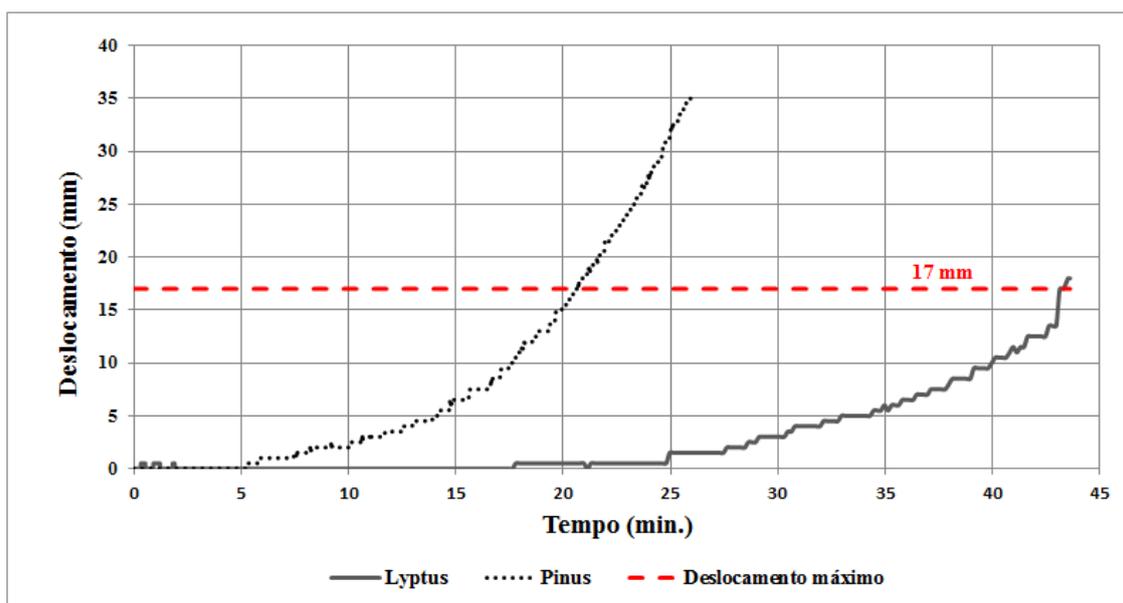


Figura 3.68: Evolução temporal da flecha no meio do vão dos elementos.

Na Figura 3.68 é possível observar a diferença no comportamento estrutural entre os dois elementos. A viga fabricada com madeira da espécie de Pinus apresentou um aumento exponencial de deslocamento após 15 minutos de exposição ao fogo, sendo que a força aplicada permaneceu constante ao longo do ensaio, e a única variação foi a redução que ocorreu na seção transversal devido ao processo de carbonização. A viga fabricada com Lyptus[®] permaneceu com deformações constantes durante 25 minutos de exposição ao fogo.

Na Figura 3.69 apresenta-se a evolução da temperatura no interior da seção transversal no decorrer do tempo de exposição ao fogo em dois pontos críticos, ou seja, pontos mais externos ao longo da largura do elemento (C1 e C3). Observou-se que o ponto C1 (com 19 mm de distância da face externa do elemento) apresentou um acréscimo de temperatura mais rápido na viga de Pinus do que na viga de Lyptus[®], indicando uma carbonização mais rápida da seção. O ponto C3 (distante da face externa em 39 mm) registrou temperatura inferior a 200°C para a viga de Pinus, ou seja, o ensaio foi encerrado antes da carbonização naquela região. Na viga de Lyptus, observou-se que o ponto C3 alcançou temperaturas superiores a 300°C, o que indica que a camada carbonização avançou até o ponto, e, portanto, ao final apresentou seção transversal residual menor do que o elemento de Pinus.

Portanto, observa-se que ao ser realizado o dimensionamento dos elementos estruturais de madeira em situação de incêndio deve se considerar a taxa de carbonização da espécie como principal parâmetro de avaliação devido à influência observada no desempenho estrutural. Todavia, o ponto crítico da viga fabricada com madeira de Pinus são as propriedades mecânicas do elemento estrutural, sendo que a as

dimensões da seção transversal foram menores para o elemento estrutural de Lyptus[®] com uma duração superior de exposição ao fogo, além de que há uma grande diferença entre o deslocamento máximo registrado.

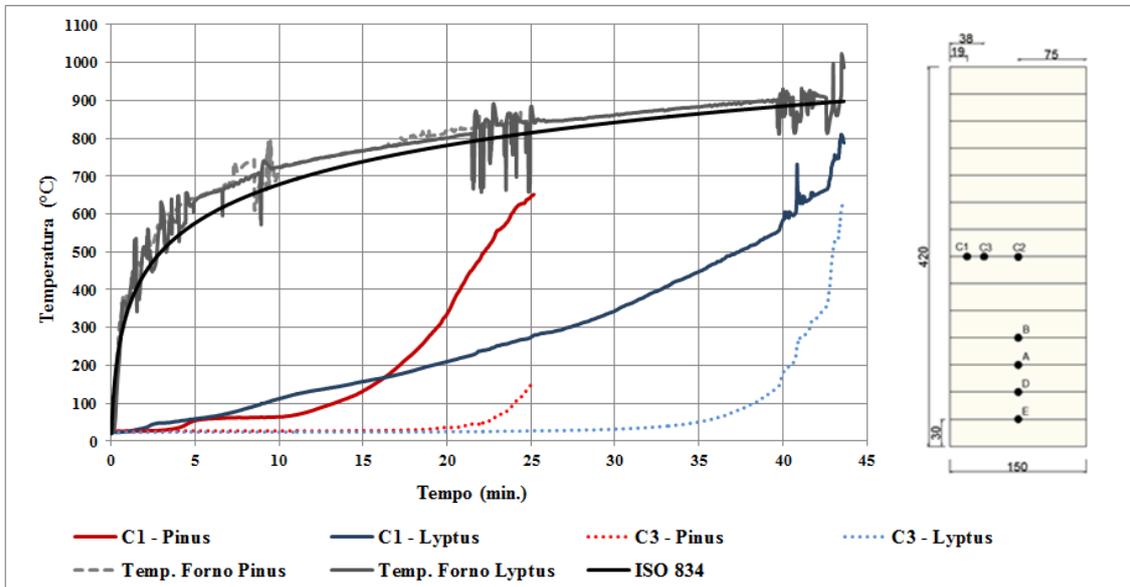


Figura 3.69: Evolução temporal da temperatura no interior da seção identificada como S2.

Na Figura 3.70 observam-se as vigas carbonizadas após a retirada do interior do forno horizontal. As regiões de apoio (parte externa do forno) mantiveram a integridade estrutural e não apresentaram carbonização. A região onde foi realizada a emenda com a ligação de pinos metálicos foi isolada com a utilização de placas de gesso e manta cerâmica e apresentou uma carbonização superficial mínima.



Figura 3.70: Vigas Carbonizadas após a retirada do interior do forno horizontal.

3.5.3.3.1. Avaliação após o ensaio em temperaturas elevadas

Para a verificação de resistência mecânica e deformações, caso não ocorra a ruína durante o aquecimento, de acordo com a ABNT NBR 5628:2001 deve-se deixar esfriar a amostra descarregada e reaplicar o carregamento.

O ensaio de flexão a três pontos foi realizado no LaMEM/EESC/USP e inicialmente foi determinado o módulo de elasticidade das vigas, como mostrado na Figura 3.71, e então retirou-se o transdutor de deslocamento (Figura 3.72) e conduziu-se o carregamento até a ruptura do elemento.



Figura 3.71: Instrumentação para determinação do Módulo de Elasticidade.



Figura 3.72: Ensaio para determinação da força de ruptura.

A seção transversal residual foi analisada após o ensaio de flexão e as dimensões estão registradas juntamente com os dados do ensaio na Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Dados obtidos após o ensaio a flexão com as vigas carbonizadas

Madeira	Duração de Exposição (min)	MOE (MPa)	Força Máxima (kN)	MOR (MPa)	Seção Transversal Residual	
					Largura (mm)	Altura (mm)
Lyptus	44	3947	22 kN	6,4	88	352
Pinus	26	4027	50 kN	14,6	102	405

As seções transversais residuais dos elementos são mostradas na Figura 3.73, bem como um *layout* com as dimensões e ilustração da espessura da camada carbonizada (região hachurada).

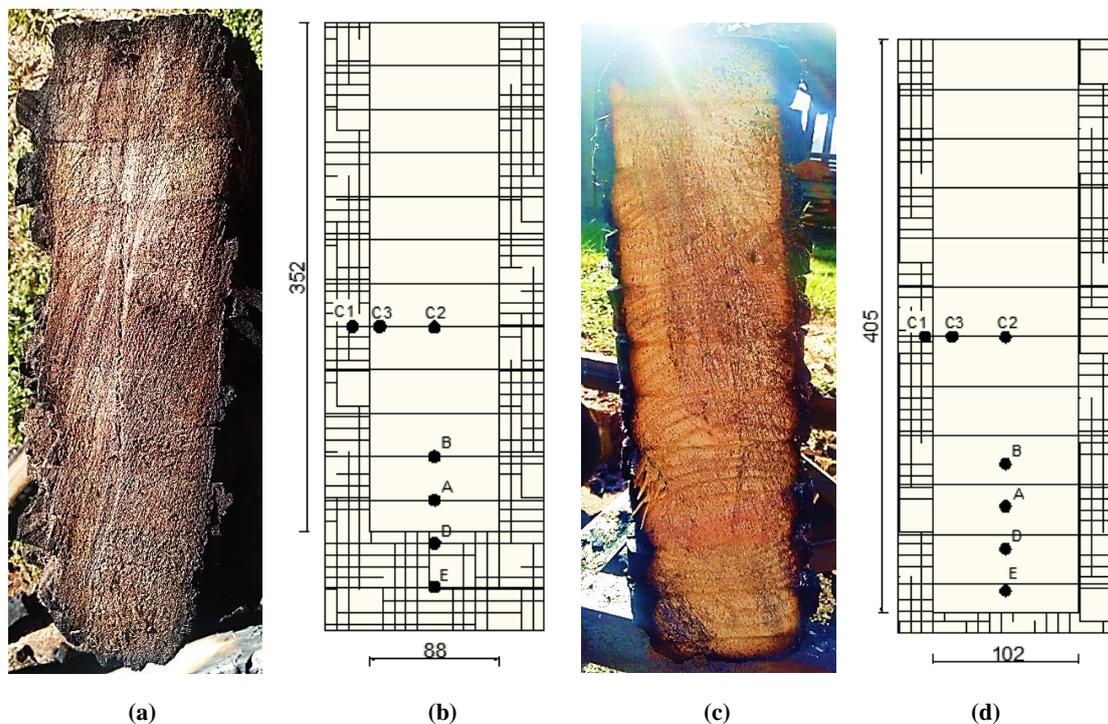


Figura 3.73: Seção transversal Residual: (a) (b) Lyptus®; (c) (d) Pinus.

Em relação ao Módulo de Elasticidade determinado antes da exposição ao fogo, o elemento estrutural de madeira Lyptus® apresentou uma redução de 49,5%, enquanto que o elemento confeccionado com madeira de Pinus reduziu o módulo de elasticidade em torno de 31%.

O desempenho estrutural da viga preparada com madeira da espécie Lyptus® durante o ensaio de flexão depois do resfriamento foi inferior ao desempenho da viga de madeira *Pinus*, como pode ser observado pelas informações disponibilizadas na Tabela 3.16. Entretanto, o tempo de exposição ao fogo durante o ensaio em temperaturas

elevadas foi praticamente duas vezes maior do que o elemento de Pinus, resultando em uma seção transversal menor.

De acordo com a ABNT NBR 5628: 2001, em caso de reaplicação do carregamento, se ocorrer ruína, o tempo que define a resistência mecânica é 80% do tempo de aquecimento, e se não ocorrer, então é o próprio tempo de aquecimento. O elemento de Lyptus colapsou com uma carga inferior a carga aplicada durante o ensaio em temperatura elevada e, portanto considera-se o tempo de aquecimento sendo igual a 35 minutos com uma redução de 80%, enquanto a viga de Pinus não rompeu com a carga aplicada durante o ensaio no forno. Sendo assim o tempo de aquecimento mantém a duração de 21 minutos.

Para a realização do ensaio em temperaturas elevadas foi necessário realizar emendas nos elementos que inicialmente tinham um comprimento de 3500 mm, como discutido anteriormente. Durante o ensaio no forno as regiões das ligações que foram preparadas com pinos metálicos foram revestidas com uma camada de gesso e manta cerâmica. A Figura 3.63 (a) apresenta na imagem um pino metálico intacto e um pino metálico retirado da viga carbonizada. Pode se observar que, com exceção das extremidades o pino permaneceu sem distorções, sendo protegido pela madeira.

A ruptura do elemento submetido novamente a uma carga concentrada no meio do vão veio a romper na parte mais frágil da estrutura, ou seja, na ligação. A Figura 3.74 (b) apresenta a ruptura ocorrida na viga preparada com madeira da espécie de *Pinus*. Pode se observar que a região apresentou carbonização mínima em relação ao restante do elemento, sendo que estava revestida com isolamento térmico.



Figura 3.74: Ligação: (a) Pino metálico; (b) região de ligação após a ruptura.

Capítulo 4

4. ANÁLISE NUMÉRICA

O comportamento de vigas de Madeira Laminada Colada (MLC) foi estudado por meio de análises não lineares em elementos finitos tridimensionais, cuja estratégia de modelagem numérica aqui proposta foi desenvolvida por Klippel (2014).

O comportamento estrutural das vigas de Madeira Laminada Colada foi estudado com o auxílio de análises não lineares em três dimensões e as correspondentes simulações numéricas utilizaram os dados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3. Basicamente, o objetivo da proposição de análises numéricas no trabalho foi estudar a influência da espécie de madeira no comportamento mecânico de elementos estruturais de MLC em situação de incêndio.

Neste capítulo, primeiramente são apresentados os princípios básicos dos modelos não lineares usados no trabalho, seguido por simulações numéricas em contexto bidimensional para avaliação da redução da seção transversal devido à carbonização dos elementos, para fins de determinação de valores para a taxa de carbonização.

O capítulo é finalizado com simulações numéricas em três dimensões com vistas a estimar a capacidade resistente ao fogo de vigas de MLC, considerando os dados obtidos nas análises experimentais, com posterior discussão dos resultados.

2.3. Princípios básicos nos modelos de elementos finitos.

As análises numéricas apresentadas neste trabalho abordam modelos térmicos e mecânicos desenvolvidos com base em elementos finitos, bidimensionais e tridimensionais, disponibilizados na biblioteca interna do pacote computacional ABAQUS[®]. Os modelos numéricos construídos com elementos finitos bidimensionais foram utilizados com a finalidade de analisar a carbonização da seção transversal e, conseqüentemente, determinar a taxa de carbonização com influência da densidade da madeira.

Por outro lado, os modelos numéricos construídos com elementos finitos tridimensionais visaram avaliar o comportamento estrutural dos elementos em situação de

incêndio. Vale ressaltar que os dados obtidos para a evolução e distribuição da temperatura no interior da seção transversal no modelo térmico foram utilizados como dados de entrada nas análises mecânicas.

Na análise térmica, a carbonização da madeira e sua consequente redução da seção transversal, leva em conta as mudanças graduais das propriedades térmicas da madeira no interior do elemento com o aumento da temperatura. No modelo térmico, a transferência de calor na face dos elementos foi realizada com valores constantes sugeridos pela Eurocode EN 1995-1-2. Para os parâmetros de emissividade por radiação o coeficiente adotado foi igual a 0,8, enquanto o coeficiente de transferência de calor por convecção foi adotado igual a 25 W/(m² K).

A condutividade térmica do material é a medida do material em conduzir calor e é usualmente dada em [W/(m K)]. Como descrito por Klippel (2014), a condutividade térmica é a quantidade de calor transmitido através de uma unidade de espessura em direção normal a face exposta ao calor em unidade de área, devido a uma gradiente de temperatura. Os valores de condutividade térmica com o aumento da temperatura foram considerados como proposto pela EN 1995-1-2, conforme apresentado na Figura 4.1 e Tabela 4.1.

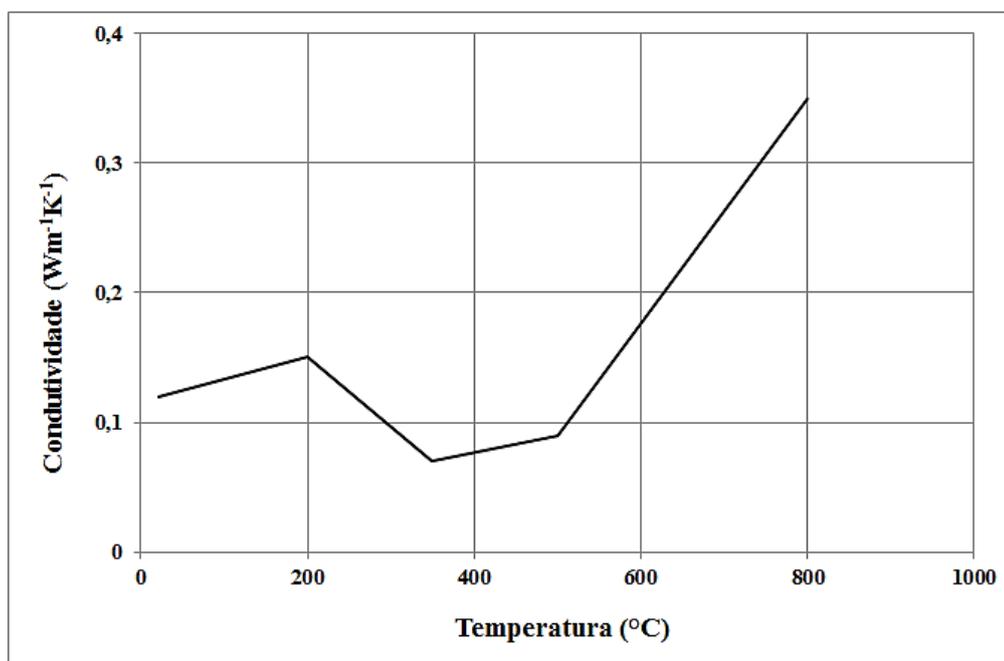


Figura 4.1: Relação entre condutividade e temperatura para a madeira e o carvão. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.

A relação entre a condutividade térmica e a temperaturas até 500 °C coincidem com os valores encontrados por meio de análises experimentais realizadas por König e Walleij (1999) e verificados em modelos numéricos. Os autores executaram uma série de ensaios com a

madeira da espécie *Spruce*, de densidade média 450 kg/m^3 e, exposta ao incêndio-padrão de acordo com a ISO 834:1999.

Em temperaturas superiores a $500 \text{ }^\circ\text{C}$, König (2005) esclarece que os valores de condutividade térmica da linha carbonizada usados nas análises são valores “efetivos” em vez de valores “reais” das propriedades dos materiais, para levar em consideração o aumento do fluxo de calor devido às fissuras em temperaturas acima de 500°C , bem como a degradação da camada carbonizada em temperaturas superiores a 1000°C .

O calor específico é a quantidade de energia, em joules, que é necessária em uma unidade de massa (1 kg) para elevar a sua temperatura em um grau. Nas análises desenvolvidas neste trabalho adotou-se a relação entre calor específico e temperaturas conforme apresentado na Figura 4.2 e Tabela 4.1.

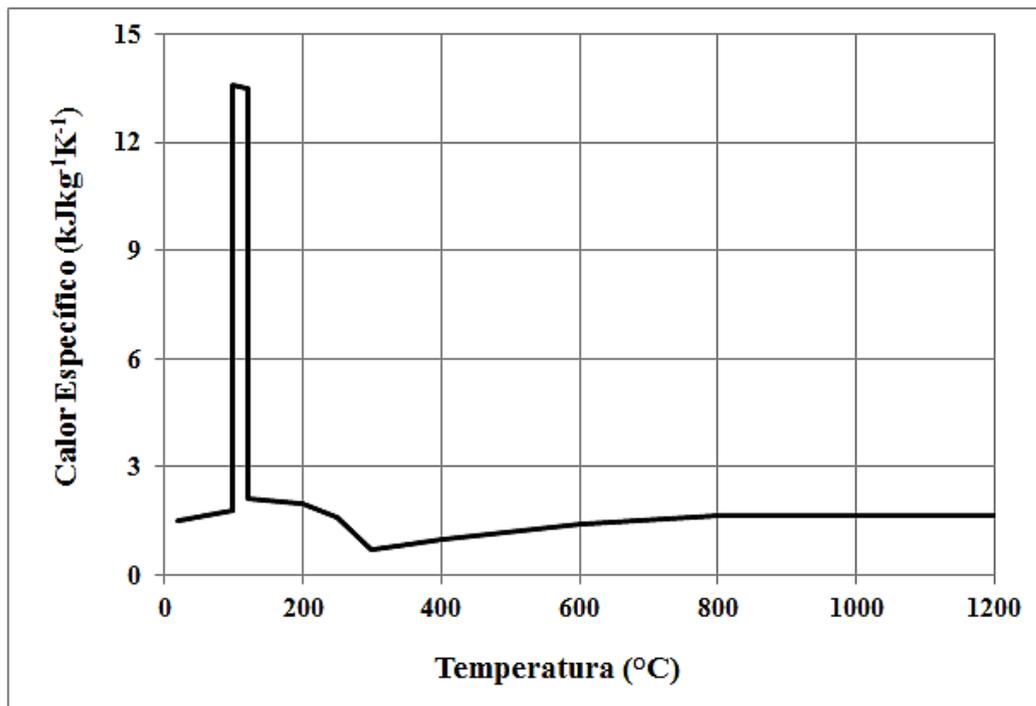


Figura 4.2: Relação do calor específico e a temperatura para a madeira e o carvão. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.

A influência da temperatura na densidade das espécies de madeira leva em consideração o teor de umidade (w) das peças. Pela EN 1995-1-2: 2004 se adotam fatores de redução conforme apresentado na Tabela 4.1. Conforme pode ser observado pela Figura 4.3, a densidade da espécie tende a valores nulos com o aumento da temperatura.

Para a convergência do modelo numérico no pacote computacional ABAQUS® na entrada de dados não se deve considerar valores nulos, e portanto foram adotados valores na

ordem de 0,01. Quando se utiliza valores nulos o modelo apresenta erro ao iniciar o processamento.

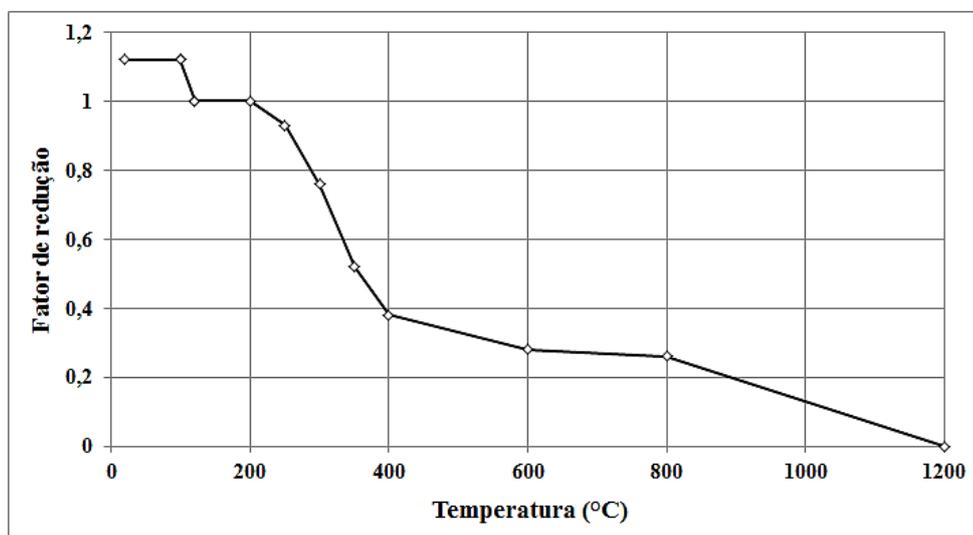


Figura 4.3: Fator de redução para a densidade com o aumento da temperatura.

Tabela 4.1. Relação das propriedades dos materiais com a temperatura. Fonte: EN 1995-1-2: 2004.

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Calor Específico ($kJ kg^{-1}K^{-1}$)	Fator de Redução da Densidade
20	0,12	1,53	1+w
99	-	1,77	1+w
99	-	13,60	1+w
120	-	13,50	1,00
120	-	2,12	1,00
200	0,15	2,00	1,00
250	-	1,62	0,93
300	-	0,71	0,76
350	0,07	0,85	0,52
400	-	1,00	0,38
500	0,09	-	-
600	-	1,40	0,28
800	0,35	1,65	0,26
1200	1,50	1,65	Zero

Com a exposição dos elementos de madeira em temperaturas elevadas, se afeta também, a resistência e a rigidez dos elementos. Em geral, as resistências à compressão, tração, flexão e cisalhamento diminuem com o aumento da temperatura.

Para os modelos desenvolvidos na presente pesquisa foram utilizados os fatores de redução propostos pela Eurocode EN 1995-1-2: 2004, apresentados na Tabela 4.2. As relações

são apresentadas por meio de curvas bilineares com resistência e rigidez máximas para temperaturas de 20°C, de modo que quando a temperatura do elemento atinja valores iguais a 300°C, a resistência e rigidez tendem a valores nulos, conforme a Figura 4.4 e Figura 4.5.

Tabela 4.2: Fatores de redução para as propriedades mecânicas de acordo com a EN 1995-1-2: 2004.

Temperatura (°C)	Resistência Paralela às fibras			Módulo de Elasticidade	
	Compressão	Tração	Cisalhamento	Tração	Compressão
20	1	1	1	1	1
100	0,25	0,65	0,4	0,35	0,5
300	0	0	0	0	0

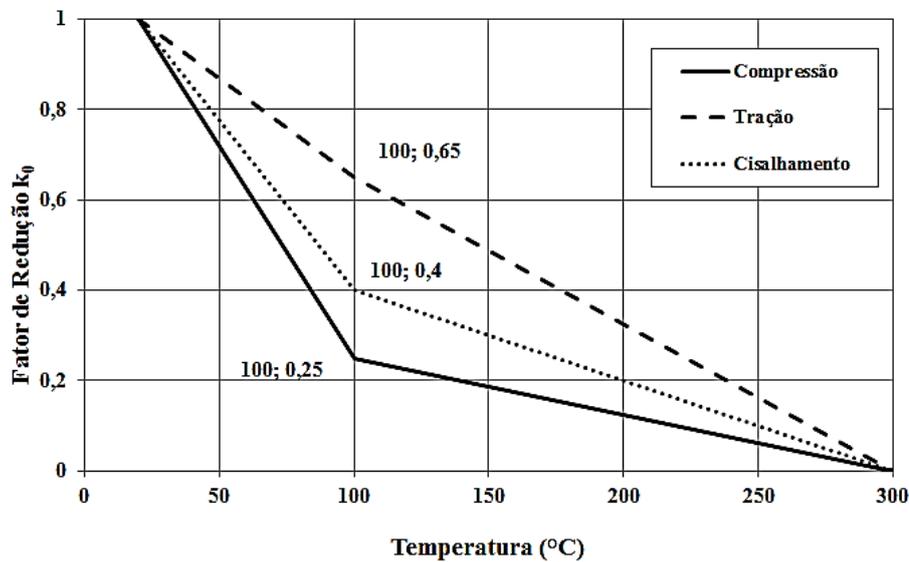


Figura 4.4: Fator de redução para resistência paralela às fibras para coníferas. Fonte: EN 1995-1-2: 2004

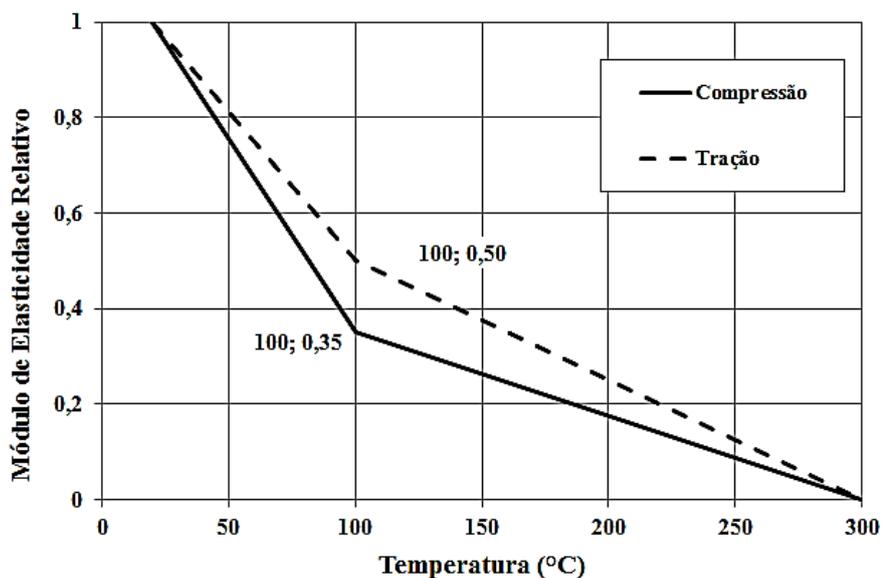


Figura 4.5: Fator de redução no MOE paralelo às fibras para coníferas. Fonte: EN 1995-1-2: 2004

No modelo termestrutural foi utilizado o modelo constitutivo disponível na biblioteca do ABAQUS, denominado “Concrete Damaged Plasticity” (CDP), sendo que não há um modelo específico para representar o comportamento da madeira. O modelo CDP é aplicado para modelagem de concreto e outros materiais quase frágeis em todos os tipos de elementos estruturais, tais como vigas, treliças, placas e sólidos. Com base no conceito de dano elástico isotrópico em combinação com plasticidade isotrópica de tração e compressão se representa o comportamento inelástico do concreto. (ABAQUS Documentation).

Como observado em Klippel (2014), a madeira assim como o concreto tem comportamento quase frágil na região de tração, enquanto que na região de compressão tem um comportamento dúctil. A diferença do comportamento nas zonas de compressão e tração podem ser implementados no modelo CDP considerando a influência da temperatura nas propriedades mecânicas. O modelo assume principalmente dois tipos de falhas mecânicas no material, sendo fissuras na tração e esmagamento na compressão, e baseia-se no conceito de elasticidade isotrópico. Entretanto, a madeira é um material altamente anisotrópico, ao contrário do concreto, o qual é usualmente assumido ser isotrópico.

O modelo CDP não permite o uso de duas relações de módulo de elasticidade, conforme Figura 4.5. Sendo assim adotou-se a relação do MOE em tração, desde que a falha em vigas na flexão é esperada ocorrer principalmente na região tracionada.

Tendo em vista que no presente estudo o objetivo foi a avaliação do comportamento de vigas de MLC em flexão, somente o comportamento do material paralelo às fibras foi modelado, seguindo a proposta do modelo de Klippel (2014).

2.4. Análise de Elementos de Madeira Laminada Colada

No desenvolvimento do trabalho foram realizadas análises em contextos bidimensional e tridimensional para avaliar o comportamento de elementos de Madeira Laminada Colada sob exposição a altas temperaturas em três faces.

A finalidade das análises bidimensionais foi a avaliação da seção transversal residual e, conseqüentemente, a determinação da taxa de carbonização das espécies. Os modelos tridimensionais foram desenvolvidos para avaliar o comportamento estrutural dos elementos de madeira em exposição ao fogo.

Os dados obtidos por meio do modelo térmico realizado em três dimensões foram usados como dados de entrada nos modelos estruturais.

As temperaturas médias registradas no interior do forno no programa experimental, descrito no capítulo 3, foram utilizadas como dados de entrada para aquecimento dos elementos nos modelos térmicos.

2.4.1. Modelo Bidimensional

As análises em duas dimensões foram aplicadas apenas em modelos térmicos, com a finalidade de estudar a redução da seção transversal e a distribuição de temperatura no interior dos elementos.

A distribuição da temperatura na seção transversal exposta ao fogo em três faces (inferior e laterais) foi realizada por meio da análise de transferência de calor usando o elemento quadrático DC2D8.

Os cantos da seção transversal na região inferior foram submetidos à transferência de calor em duas direções e, portanto a carbonização foi mais rápida gerando o arredondamento dos cantos, como discutido em TR 10 (2013). Para representar o efeito de arredondamento nos cantos da seção transversal no modelo térmico foi realizado o refinamento da malha na região inferior, como ilustrado na Figura 4.6 (a).

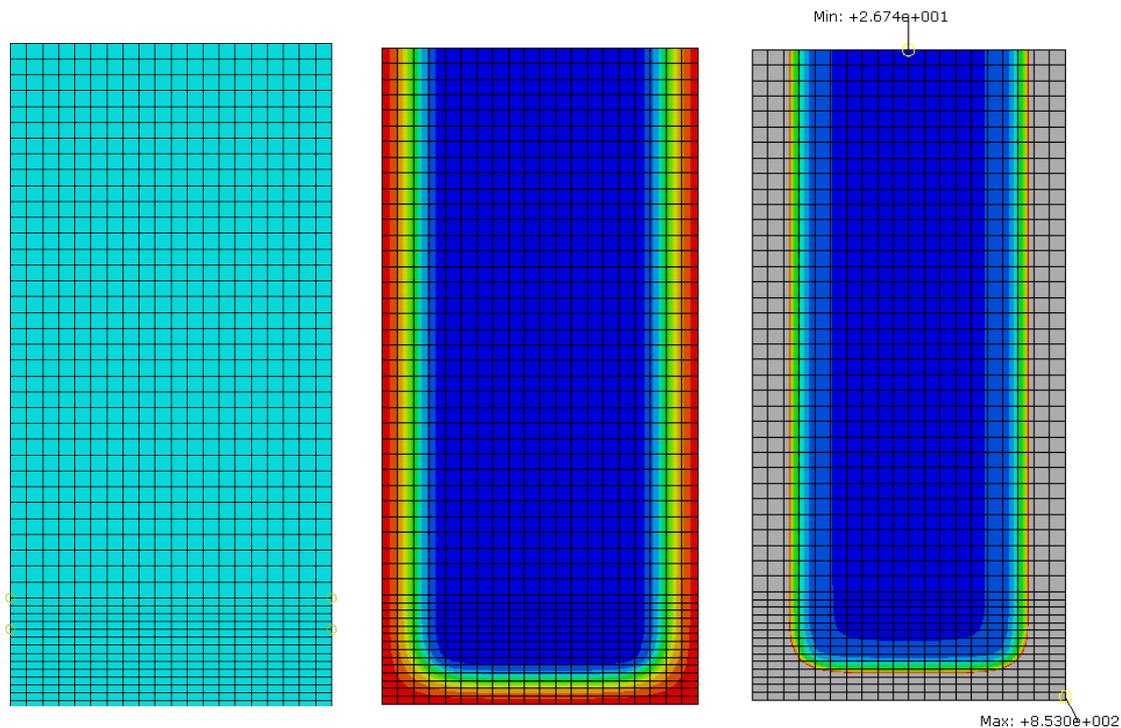


Figura 4.6: Modelo Térmico: (a) Malha; (b) Gradiente de Temperatura; (c) Isotherma de 300°C em destaque

A malha utilizada foi escolhida com a finalidade de encontrar o tamanho ideal que não comprometesse os resultados, bem como não apresenta-se um alto custo computacional. Na Figura 4.6 (b) é ilustrada a distribuição da temperatura na seção transversal.

A linha da camada carbonizada foi considerada como sendo a posição da isoterma de 300 °C, como recomendado pela EN 1995-1-2. Portanto, as regiões que apresentam temperaturas superiores a 300 °C são consideradas carbonizadas, ilustrada pela região em cinza na Figura 4.6 (c), de modo a se determinar a seção transversal remanescente (região com temperaturas inferiores a 300 °C).

Os modelos térmicos bidimensionais foram construídos para representar os elementos utilizados para avaliação da carbonização, descritos no item 3.5.2. No programa experimental foram realizados dois ensaios que avaliaram simultaneamente quatro (4) vigas. Os registros de temperatura média dos termopares instalados no interior do forno foram assumidos para representar a fonte de aquecimento no modelo. As informações referentes aos ensaios encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Informações referentes aos ensaios no forno horizontal

Identificação do ensaio	Espécie de Madeira	Tratamento Preservante	Duração do Ensaio (min)	Temperatura Máxima (°C)
T1 – LP 30	Lyptus / Pinus	Não	32	850
T2 – LP 40	Lyptus / Pinus	Não	40	905

No total foram preparados oito modelos térmicos, representando os oito elementos expostos a altas temperaturas em dois ensaios. Para cada modelo foi utilizado a densidade aparente determinada no item 3.2 e apresentada novamente na Tabela 4.4. Cada modelo foi aquecido por meio da curva de exposição ao fogo obtida no respectivo ensaio.

Tabela 4.4: Informações referentes aos elementos utilizados nos ensaios no forno horizontal.

Identificação do Ensaio	Identificação do Elemento	Densidade (kg/m³)	Identificação do Modelo
T1 – LP 30	L5	773,2	MOD L5
	L6	784,6	MOD L6
	P3	494,6	MOD P3
	P6	499,0	MOD P6
T2 – LP 40	L4	683,21	MOD L4
	L8	749,21	MOD L8
	P7	492,96	MOD P7
	P8	497,49	MOD P8

2.4.1.1. Determinação da Taxa de Carbonização

Durante a exposição ao fogo, à altura e a largura da seção diminuem em uma taxa que depende da taxa de carbonização da espécie. A Figura 4.7 ilustra o avanço da camada carbonizada (isoterma de 300°C) no modelo numérico realizado na fase inicial do trabalho para estudo da aplicação do método.

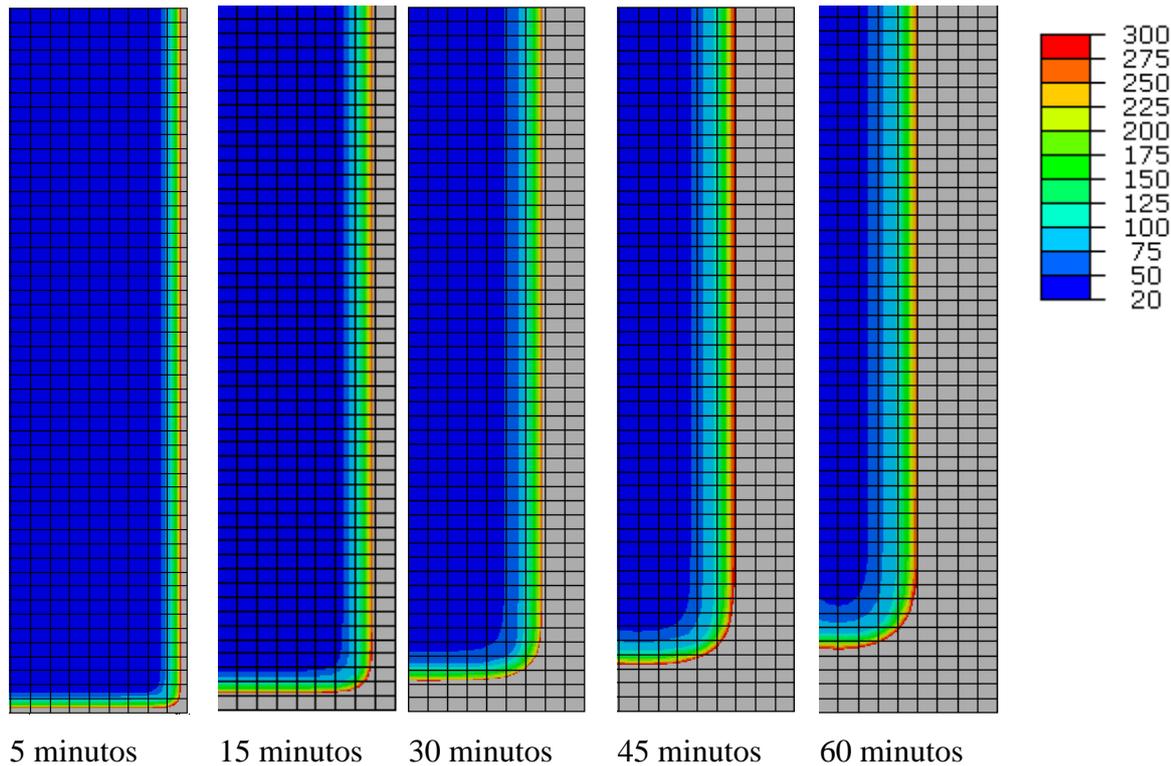


Figura 4.7: Carbonização em diferentes tempos de exposição para a espécie Pinus

A determinação das medidas da região em cinza, ao longo da altura e da largura da seção foi utilizada como a espessura da camada carbonizada, e conseqüentemente, para fins de determinação da seção transversal residual e taxa de carbonização de cada modelo.

Na Figura 4.8 (a) apresenta-se a distribuição da malha adotada no modelo numérico para fins de análise térmica. Os pontos em vermelho indicam os pontos nodais para o registro da temperatura como dados de saída da análise, os quais estão localizados nas coordenadas de posicionamento dos termopares, conforme Figura 4.8 (b).

Na Figura 4.9 e na Figura 4.10 são ilustrados os gradientes de temperatura no interior da seção (ilustrada apenas a metade) obtida por meio do modelo térmico desenvolvido.

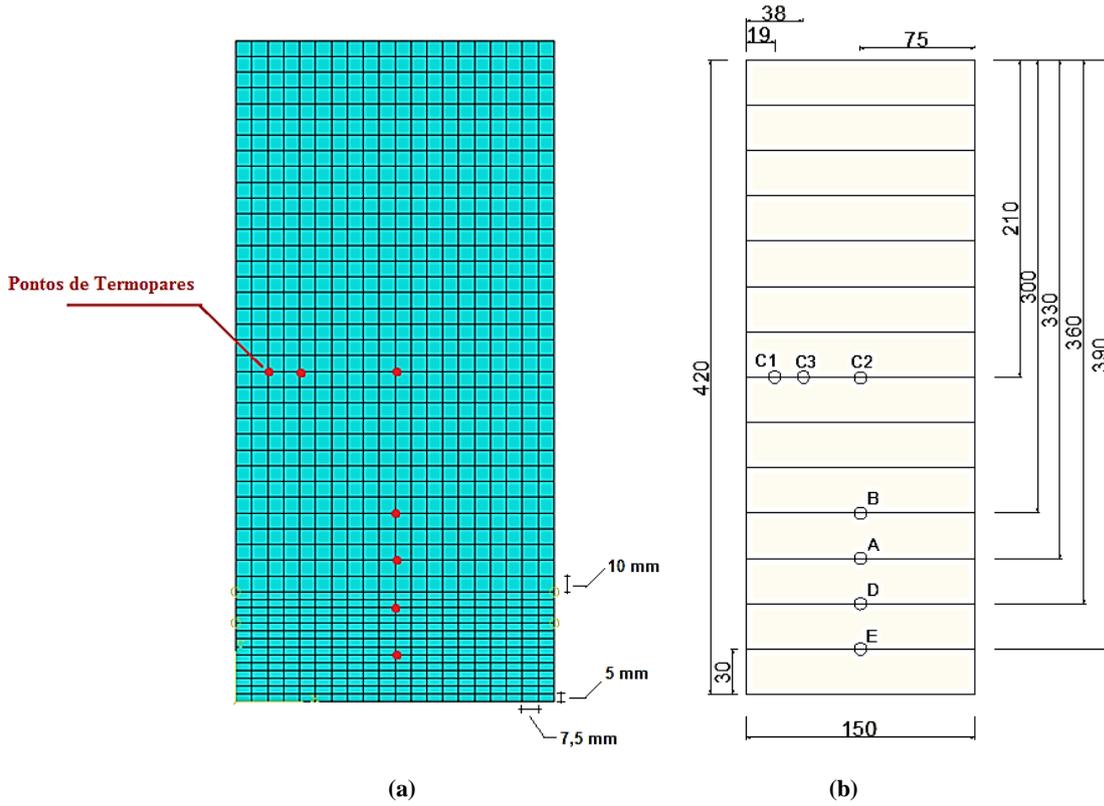


Figura 4.8: Seção Transversal do elemento: (a) Refinamento da malha no modelo térmico; (b) distribuição dos termopares nos elementos preparados para ensaio.

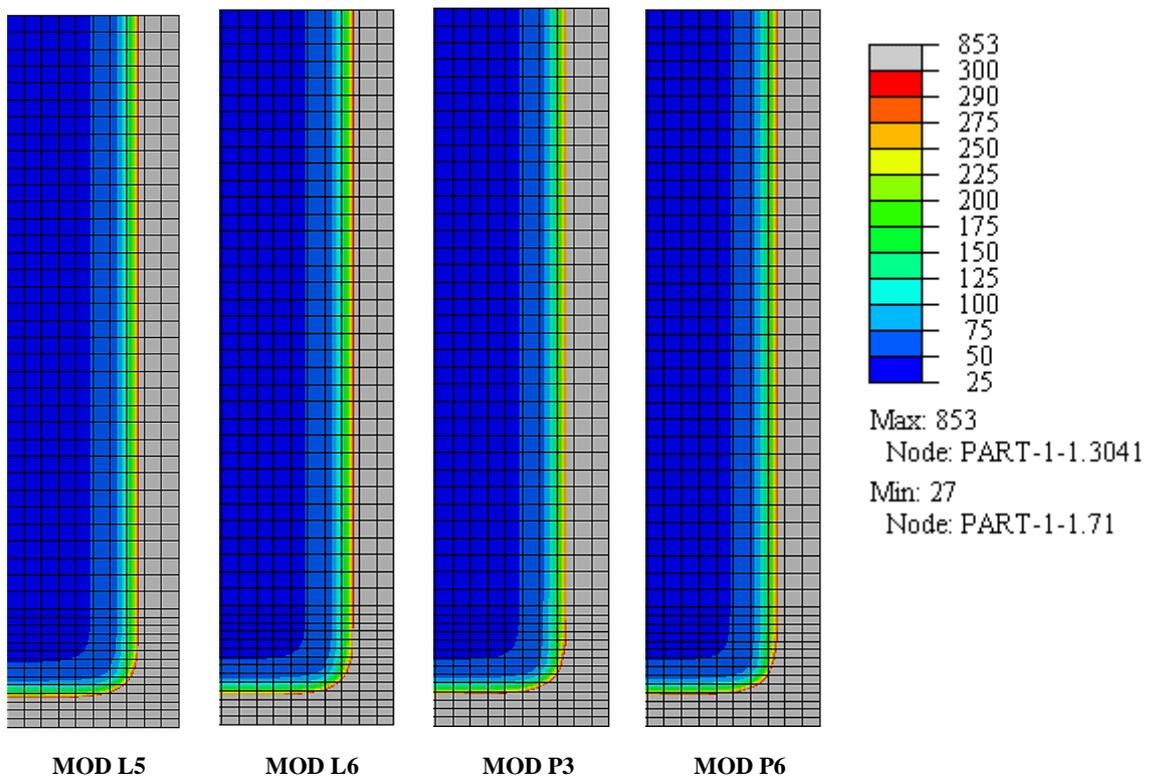


Figura 4.9: Modelo Térmico T1 – LP30: Gradiente de temperatura no interior da seção transversal.

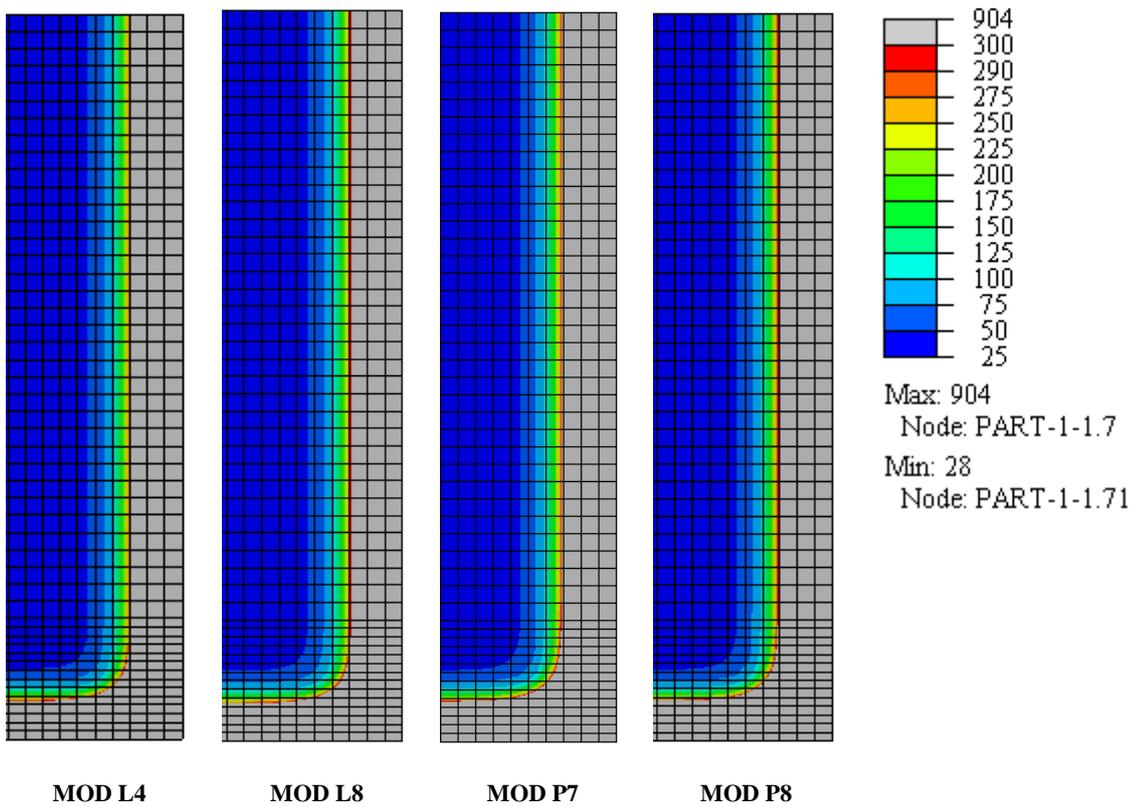


Figura 4.10: Modelo Térmico T2 – LP40: Gradiente de temperatura no interior da seção transversal.

Na Tabela 4.5 são apresentados os dados obtidos a partir da resposta do modelo térmico bidimensional. A espessura carbonizada foi obtida pela contagem dos elementos em cinza, ou seja, temperaturas superiores a 300 °C. A seção residual foi determinada excluindo-se a camada carbonizada, e a taxa de carbonização é a relação entre espessura carbonizada e a duração da exposição ao fogo.

Como observado nos resultados da análise experimental, a espessura da camada carbonizada e a taxa de carbonização estão mais evidenciados nas faces inferiores (altura), do que nas faces laterais (largura).

Tabela 4.5: Dados obtidos a partir do modelo térmico bidimensional. (continua)

Tempo (min)	Identificação do Modelo	Espessura (mm)		Seção Residual (mm)		Taxa de Carbonização (mm/min)	
		Altura	Largura	Altura	Largura	Altura	Largura
32	MOD L5	17,5	18	402,5	114	0,547	0,563
	MOD L6	17,5	18	402,5	114	0,547	0,563
	MOD P3	20	18,75	400	112,5	0,625	0,586
	MOD P6	19	18,75	401	112,5	0,594	0,586

Tabela 4.5: Dados obtidos a partir do modelo térmico bidimensional. (Conclusão)

Tempo (min)	Identificação do Modelo	Espessura (mm)		Seção Residual (mm)		Taxa de Carbonização (mm/min)	
		Altura	Largura	Altura	Largura	Altura	Largura
40	MOD L4	22,5	22,5	397,5	105	0,563	0,563
	MOD L8	22,5	22,5	397,5	105	0,563	0,563
	MOD P7	25	24	395	102	0,625	0,600
	MOD P8	25	24	395	102	0,625	0,600

Os valores de taxa de carbonização determinados nos ensaios experimentais confirmaram as observações apresentadas nos trabalhos de Schaffer (1967) e Yang et al (2009b). No caso, a taxa de carbonização tendeu a diminuir com o aumento do tempo de exposição ao fogo. Entretanto, pelo modelo numérico se nota um ligeiro aumento da taxa de carbonização em relação ao tempo de exposição.

Na Figura 4.11 observa-se a relação entre a densidade e a taxa de carbonização. Quanto maior a densidade do elemento de madeira, menor a taxa de carbonização. Por meio de regressão linear foi possível estabelecer uma equação potencial ($R^2 = 0,9787$)

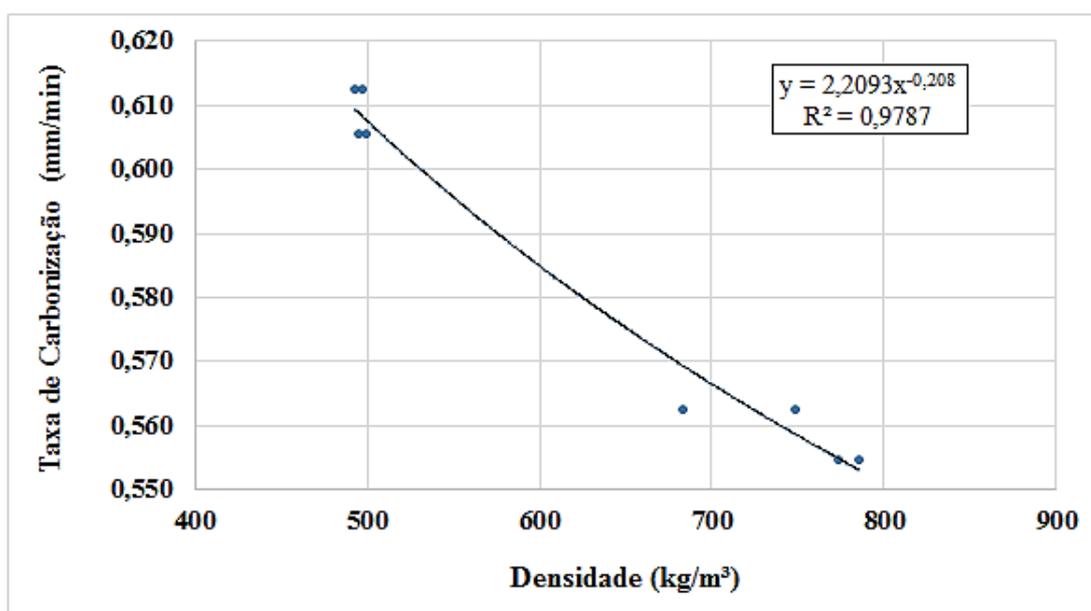


Figura 4.11: Relação entre a densidade e a taxa de carbonização a partir do modelo numérico

Na Figura 4.12 é apresentada a evolução temporal da temperatura de acordo com os dados obtidos pelo modelo numérico considerando as propriedades das madeiras de espécie *Pinus* e *Eucalyptus* (Lyptus®).

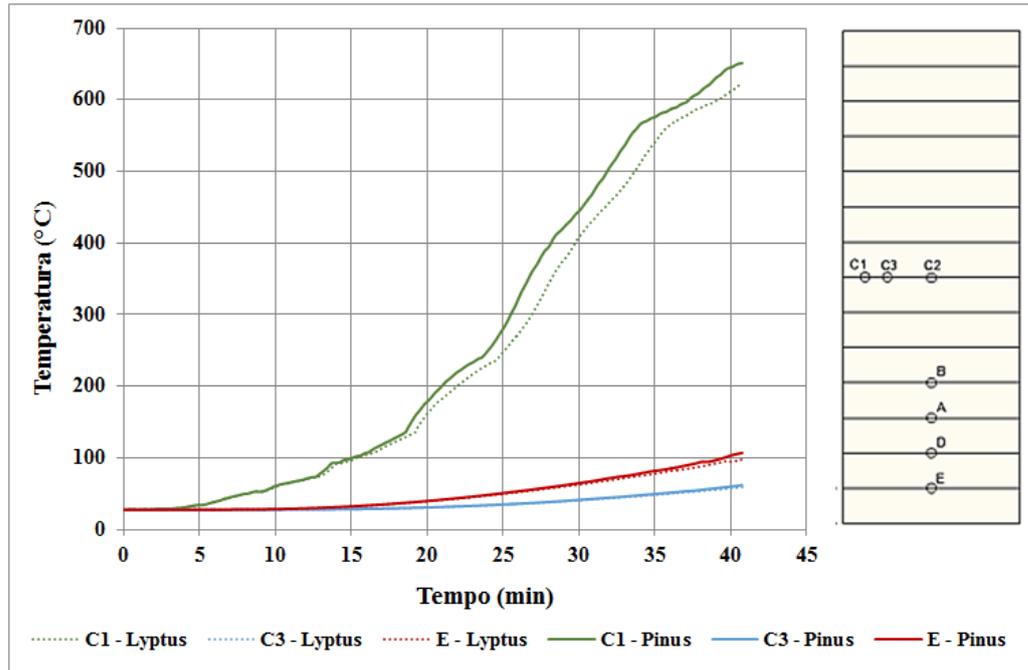


Figura 4.12: Evolução da temperatura a partir do modelo numérico para as vigas de Lyptus e Pinus.

No gráfico são ilustradas as evoluções das temperaturas para os termopares instalados mais próximos das faces externas do elemento. O ponto C1 apresenta temperaturas mais elevadas, pois se encontra na região carbonizada do elemento. Os elementos de Pinus apresentam temperaturas maiores do que as encontradas no interior dos elementos de Lyptus®, devido a densidade ser menor, sendo esta a única variação entre os modelos.

Na Figura 4.13 foi realizada uma correspondência entre a evolução da temperatura no interior da seção obtida por meio do modelo numérico e pelos registros dos termopares (modelo experimental). No modelo numérico as temperaturas registradas após 20 minutos de exposição ao fogo, no caso, temperaturas superiores a 100 °C apresentaram uma grande diferença em relação às temperaturas obtidas pelo modelo experimental.

Portanto, os valores adotados para as propriedades térmicas propostos pela Eurocode 5, principalmente em relação à condutividade térmica devem ser reavaliados ao serem aplicados.

Na Figura 4.14 ilustra-se a seção transversal residual para o elemento L4 a partir dos dados do modelo numérico e experimental. A região hachurada representa a camada carbonizada. A seção residual a partir do modelo numérico é maior do que se obteve ao final dos ensaios, entretanto as temperaturas registradas para o ponto C1 (na área carbonizada) foram maiores para o numérico.

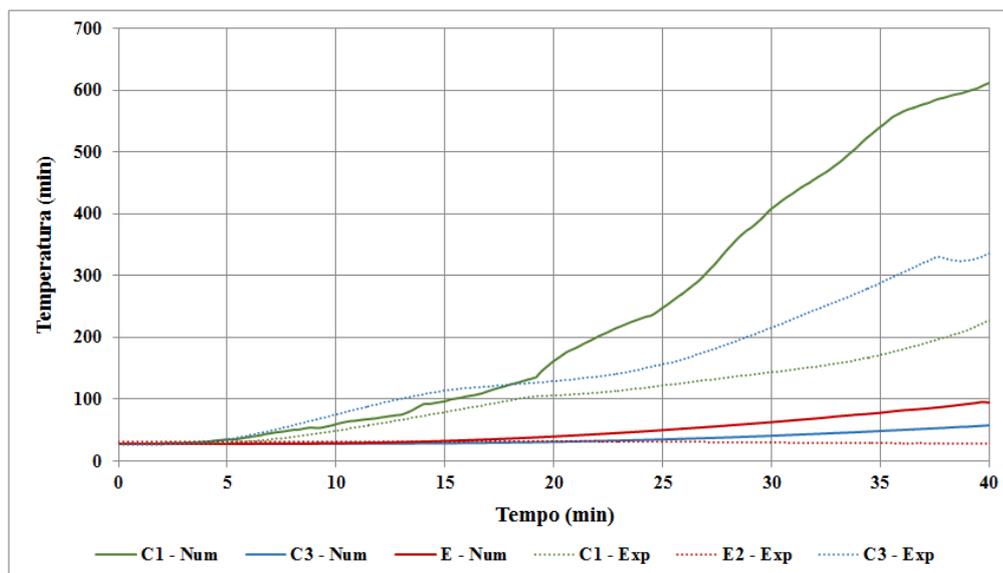


Figura 4.13: Evolução da temperatura para a viga L4 a partir do modelo numérico e o experimental.

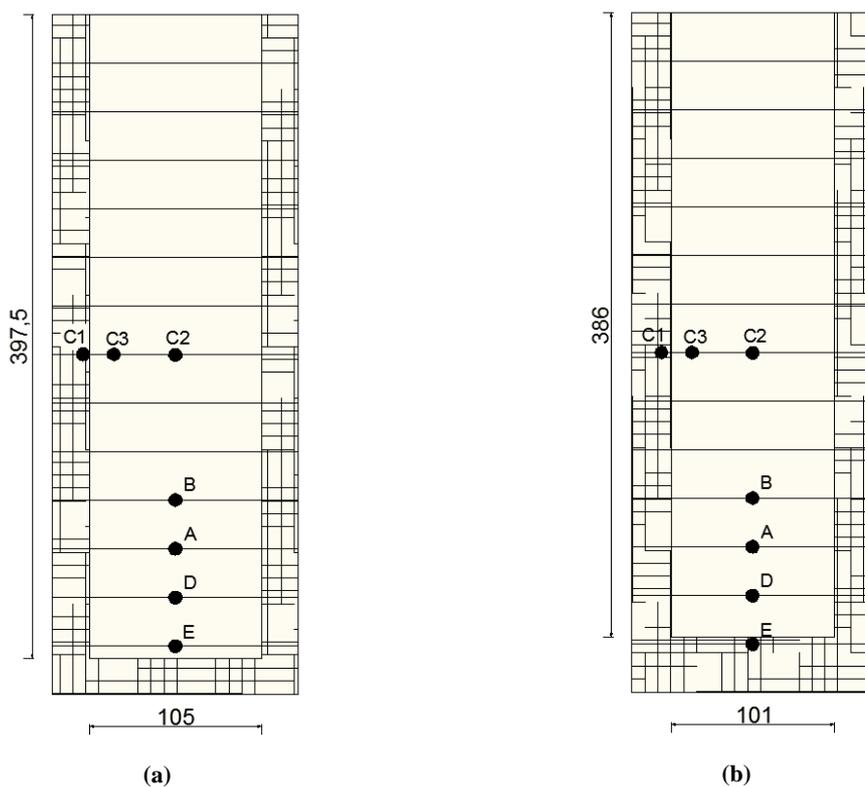


Figura 4.14: Seção Transversal Residual da viga L4: (a) Modelo Numérico; (b) Experimental.

A proposta do trabalho foi a utilização das propriedades térmicas de acordo com a proposta do método de cálculo avançado disponível na Eurocode 5 (EN 1995-1-2: 2004). Os valores estabelecidos na Eurocode 5 foram determinados a partir de uma série extensa de ensaios com a madeira de espécie *Spruce*, densidade em torno de 450 kg/m³. Com os resultados encontrados no trabalho conclui-se que para as madeiras de espécie brasileiras

serão necessários desenvolver trabalhos futuros com um estudo mais aprofundado das propriedades e estabelecer valores apropriados as espécies nacionais.

4.2.2. Modelo Tridimensional

A influência da temperatura no desempenho estrutural de elementos de Madeira Laminada Colada (MLC) foi estudada por meio de uma sequência de análise térmica e mecânica em modelos tridimensionais. Assim, primeiramente se determinou a distribuição da temperatura na seção transversal para, em seguida, proceder a realização de uma análise mecânica, tendo como dados de entrada a resposta da distribuição de temperatura obtida no modelo térmico.

4.2.2.1. Elementos em estudo

Os elementos modelados representaram as vigas submetidas a aplicação de carregamento e exposição ao fogo nos ensaios realizados no forno horizontal da EESC/USP, com dimensões para a seção transversal de 150 mm por 420 mm e vão livre igual a 5100 mm.

Foram realizadas análises considerando as propriedades mecânicas determinadas em ensaios realizados à temperatura ambiente (20 °C) aplicando-se os fatores de redução propostos pela Eurocode 5. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores para as propriedades utilizadas nas análises voltadas ao modelo estrutural.

Em temperaturas superiores a 300 °C, de acordo com a Eurocode 5, os valores para as propriedades mecânicas são anulados. Entretanto, para a simulação numérica adotou-se 0,01 do valor inicial, pois para o processamento do modelo não pode haver valores nulos.

Tabela 4.6: Propriedades mecânicas utilizadas nas análises

Madeira	Classe de resistência	Temp. (°C)	MOE (MPa)	Resist. à Tração (MPa)	Resist. à compressão (MPa)
Lyptus®	C60	20	7816	51,4	64,9
		100	3908	33,41	25,96
		300	78,16	0,514	0,649
Pinus	C30	20	5815	27,46	32,12
		100	2908	17,85	12,85
		300	58,15	0,275	0,321

4.2.2.1. Modelo Térmico

A distribuição da temperatura no elemento foi realizada pelo desempenho da análise de transferência de calor usando os elementos DC3D8 (linear com oito nós). As médias das temperaturas registradas pelos termopares do forno foram utilizadas como fonte de aquecimento no modelo.

Foram consideradas as condições de contorno de radiação e convecção nas superfícies expostas ao fogo (face inferior, faces laterais), e na face superior do elemento foi mantida a temperatura ambiente representando a face isolada termicamente com manta cerâmica.

A fim de representar o efeito de arredondamento dos cantos devido à exposição em duas direções que ocorre na região inferior do elemento, foi necessário adotar maior grau de refinamento para representação do efeito. Como mostrado na Figura 4.15, adotou-se na região inferior (altura de 70 mm) um refinamento mais elaborado do que no restante da seção (altura de 350 mm), a fim de diminuir o custo computacional.

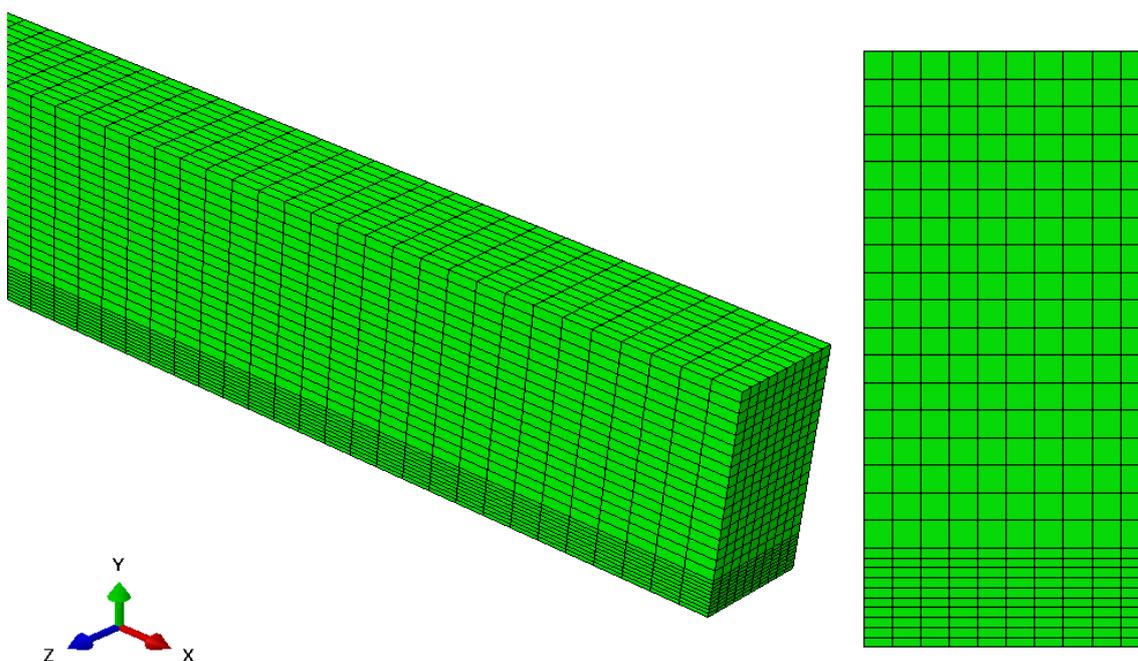


Figura 4.15: Ilustração da malha utilizada no modelo térmico tridimensional.

A Figura 4.16 ilustra as seções transversais residuais correspondentes aos elementos no modelo numérico e por meio dos ensaios, sendo que para o ensaio com elementos de madeira da espécie *Pinus*, a duração total foi de 26 minutos, enquanto para o Lyptus® o ensaio estendeu-se por 44 minutos.

Na Figura 4.17 ilustra-se a distribuição de temperatura ao longo do elemento obtido por meio do modelo térmico, sendo a região em cinza a camada carbonizada, ou seja, temperaturas superiores a 300 °C.

Todavia, a seção transversal residual apresentada a partir dos ensaios foi obtida a partir de elementos nos quais não foi possível extinguir as chamas depois de desligado os queimadores, devido à montagem adotada discutida anteriormente no capítulo de análise experimental. Portanto, os elementos continuaram o processo de carbonização, ou seja, a seção transversal residual é menor do que aconteceria caso as chamas fossem extintas em curto período de tempo.

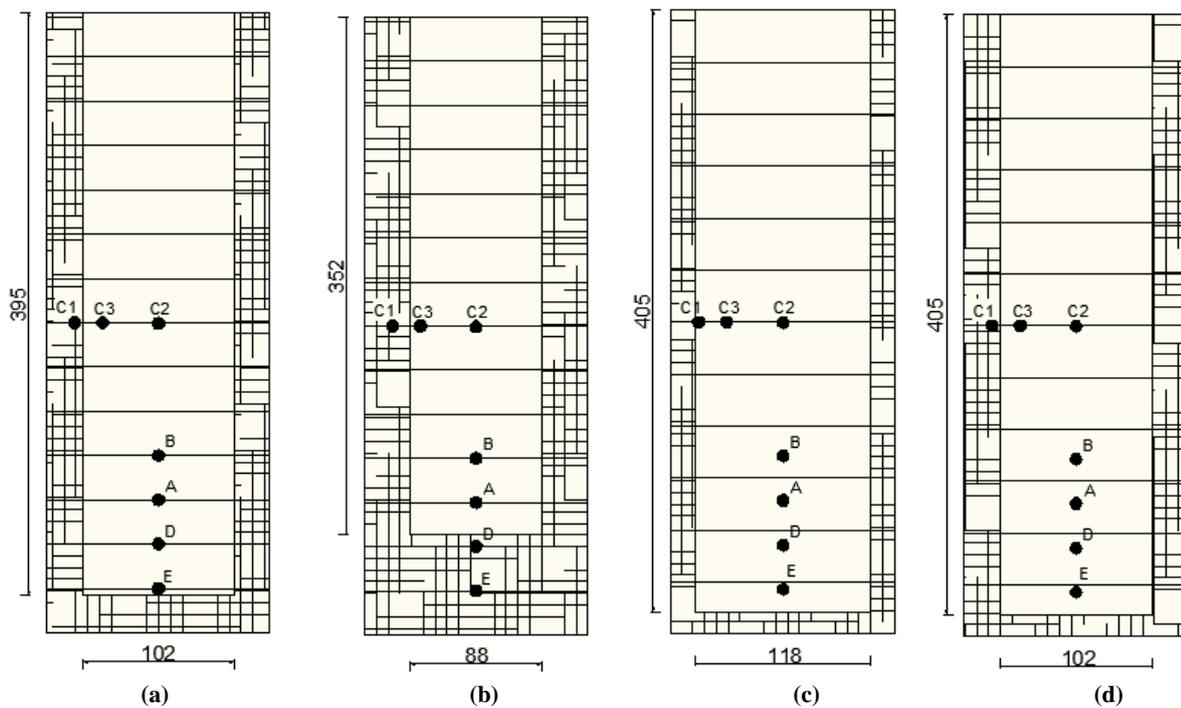


Figura 4.16: Seção Transversal residual: (a) Numérico – Lyptus; (b) Experimental Lyptus; (c) Numérico – Pinus, (d) Experimental – Pinus.

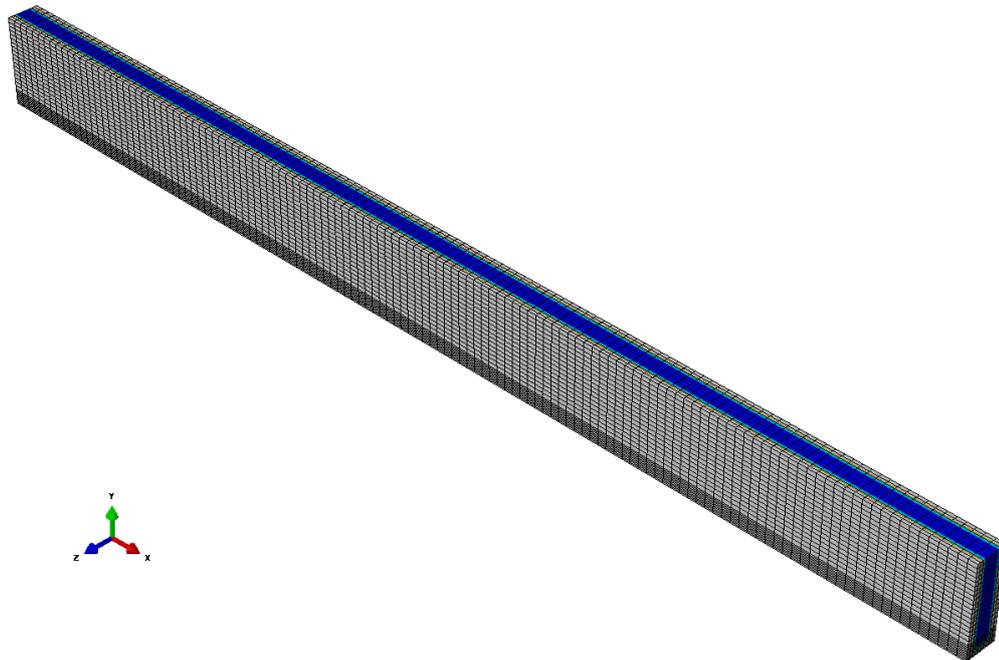


Figura 4.17: Ilustração do modelo térmico para o elemento constituído de madeira Lyptus®.

Na Figura 4.18 e na Figura 4.19 apresenta-se a evolução da temperatura para os pontos C1 e C3, os quais correspondem à coordenada de localização dos termopares no modelo experimental. Analisando os gráficos observa – se para temperaturas superiores a 100 °C, as evoluções da temperatura pelos modelos numérico e experimental se distanciam.

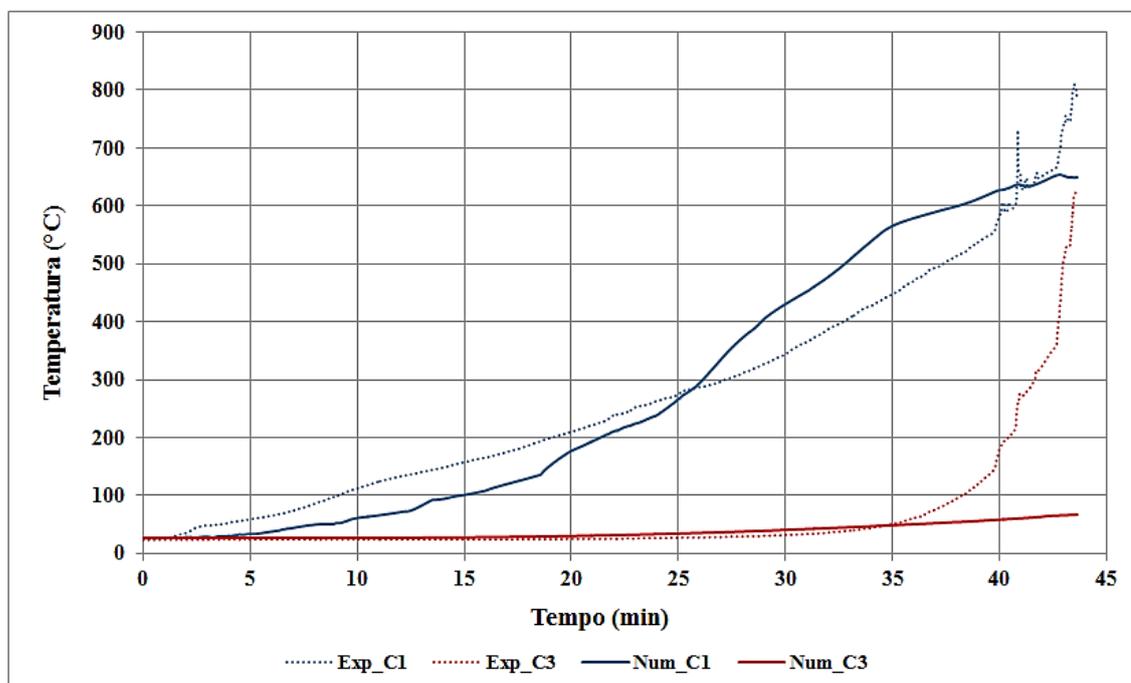


Figura 4.18: Evolução da temperatura no interior do elemento de Lyptus®.

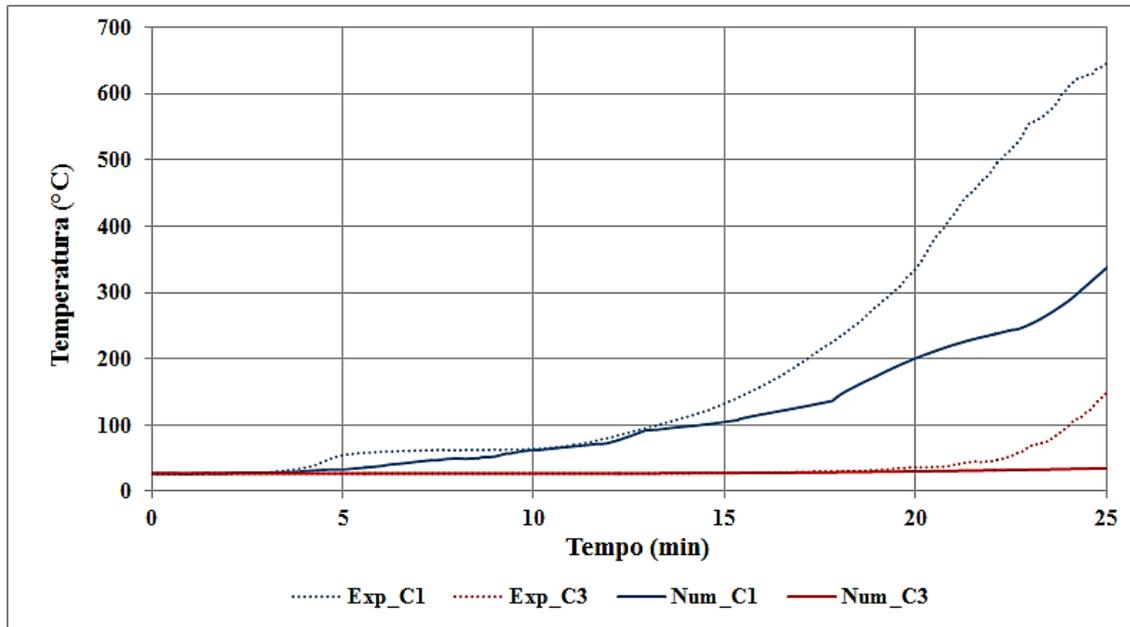


Figura 4.19: Evolução da temperatura no interior do elemento de *Pinus*.

4.2.2.2. Análise Termomecânica

A análise mecânica dos elementos foi realizada posteriormente à análise térmica. Primeiramente, foram realizadas análises térmicas em um modelo tridimensional, e em seguida, os resultados da distribuição de temperatura ao longo do elemento foram utilizados como dados de entrada para avaliação estrutural. A análise foi realizada com a finalidade de determinar a redução da capacidade estrutural do elemento com o aumento da temperatura.

O método de cálculo avançado proposto pela norma EN 1995-1-2: 2004 foi aplicado no desenvolvimento do modelo. As propriedades mecânicas utilizadas foram apresentadas na Tabela 4.6, e adotou-se o elemento C3D8R com oito nós e integração reduzida no desenvolvimento do modelo.

O tempo de aquecimento considerado durante o processamento foi determinado a partir dos ensaios realizados no forno. Para a viga de *Pinus* a duração foi igual a 26 minutos, enquanto que para a viga de *Lyptus* os queimadores foram desligados após 44 minutos. A curva de aquecimento registrada por meio de termopares instalados no interior do forno foi utilizada como dados de entrada nos modelos.

A malha no modelo térmico foi realizada com refinamento mais elaborado, principalmente na região inferior, como ilustrado na Figura 4.20 (b). Para o modelo mecânico optou-se por utilizar uma malha menos refinada devido ao elevado custo computacional exigido para o processamento. No modelo com uma malha mais refinada foi possível observar o efeito do arredondamento dos cantos com mais precisão. Devido à incompatibilidade de

malhas, durante o processamento realizou-se uma interpolação dos valores térmicos para aplicação na análise mecânica.

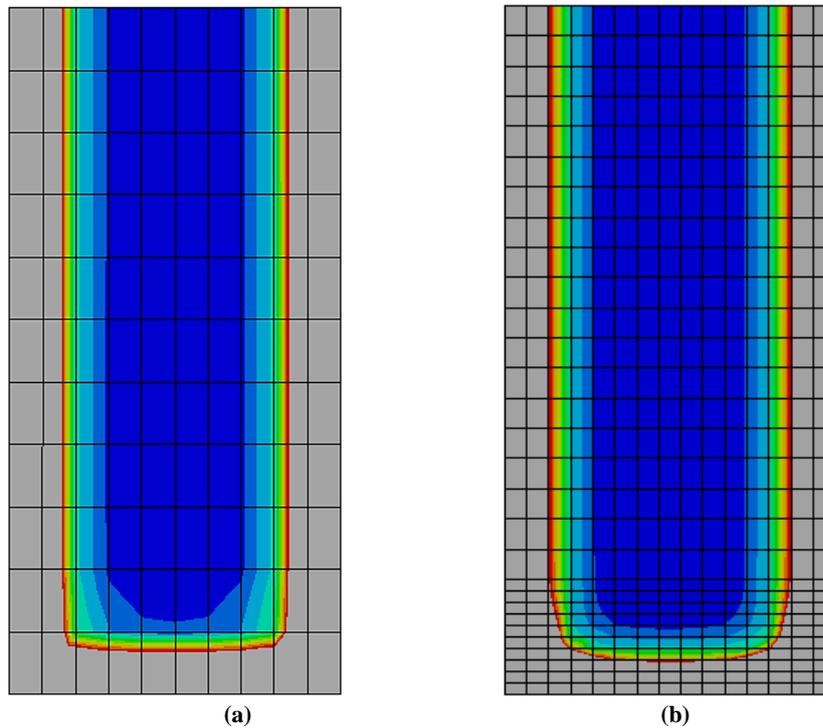


Figura 4.20: Distribuição da temperatura: (a) Modelo Mecânico; (b) Modelo Térmico.

Na Figura 4.21 apresenta-se uma comparação entre o perfil de temperatura obtido por meio da análise térmica, na qual se realizou uma malha mais refinada e na análise mecânica, na qual foi realizada uma interpolação dos valores térmicos.

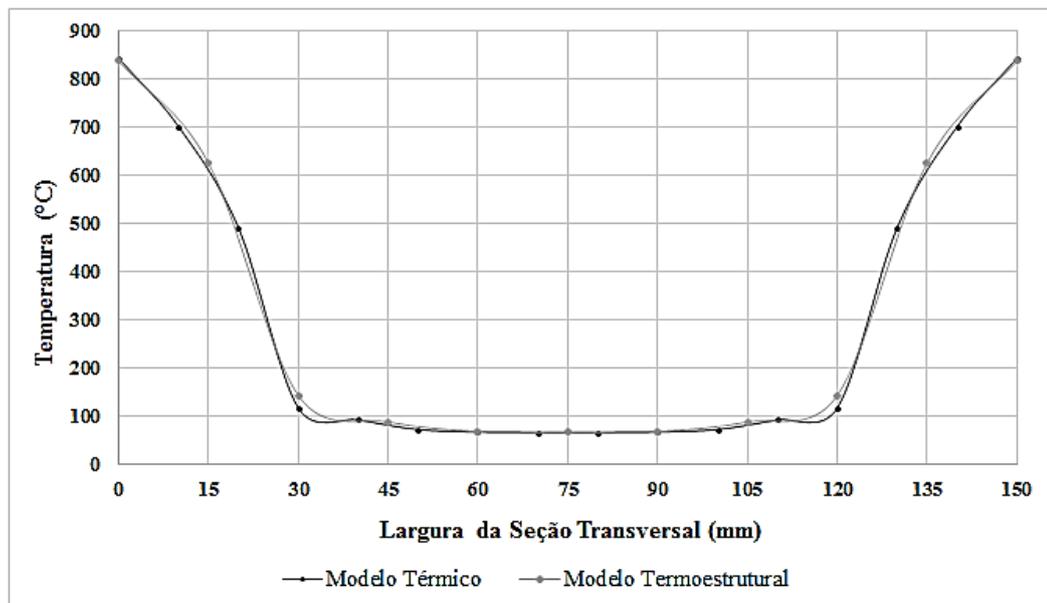


Figura 4.21: Comparação do perfil na análise Térmica e na análise Termoestrutural.

O estudo para desenvolvimento da malha foi desenvolvido com o objetivo de encontrar um tamanho de malha ideal que não compromettesse os resultados e o custo computacional. Observou-se que a melhor proposta foi realizar o refinamento na parte inferior da seção para representação do efeito de arredondamento e no restante da seção uma malha mais grosseira. Para o modelo mecânico quando foi aplicada uma malha com um maior grau de refinamento não foi possível realizar a convergência do modelo devido ao espaço necessário para armazenamento.

A carga foi aplicada por uma força concentrada em cada nó ao longo da largura da viga, tendo a mesma intensidade da carga aplicada nos ensaios. O modelo “Concrete Damaged Plasticity - CDP” foi utilizado para descrever o comportamento mecânico. Para evitar erro de convergência nos pontos de apoio e aplicação de carregamento, adotou-se o comportamento do material sendo elástico linear.

A Figura 4.22 mostra o modelo numérico usado no estudo, o qual permite análise em contexto tridimensional e desenvolvido sem qualquer consideração de simplificação voltada à simetria do elemento, permitindo-se assim levar em conta a superposição dos fluxos de calor no interior da seção transversal.

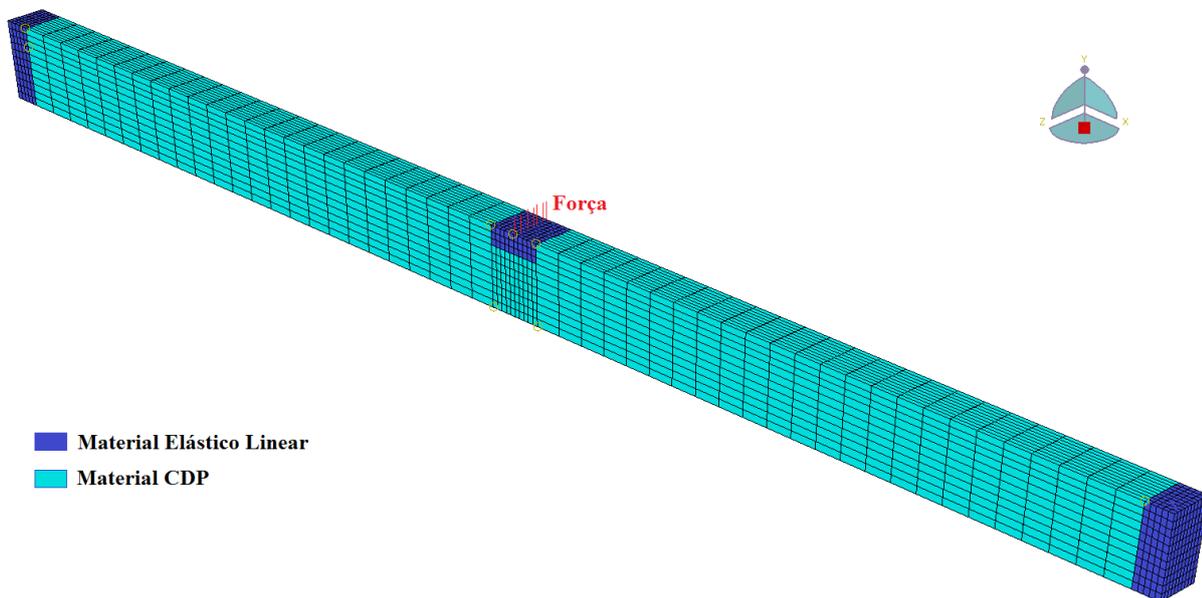


Figura 4.22: Características do modelo numérico aplicado nas análises.

No modelo numérico que representa os elementos de madeira Lyptus[®] aplicou-se uma carga concentrada igual a 25 kN, enquanto que para os elementos com as propriedades mecânicas da madeira da espécie de *Pinus*, a carga aplicada foi de 23 kN. Na Figura 4.23 apresenta-se a reação da força que foi distribuída para os apoios.

Na Figura 4.24 apresenta-se a evolução temporal do deslocamento ocorrido no meio do vão durante as análises, onde se considerou a aplicação de uma força concentrada constante no meio do vão, simultaneamente com o avanço da frente de carbonização para o interior da seção transversal. No diagrama observa-se a diferença entre os dois elementos que são constituídos de madeiras de espécies e classes de resistência distintas. Na Figura 4.25 apresenta-se a evolução do deslocamento com o aumento da temperatura.

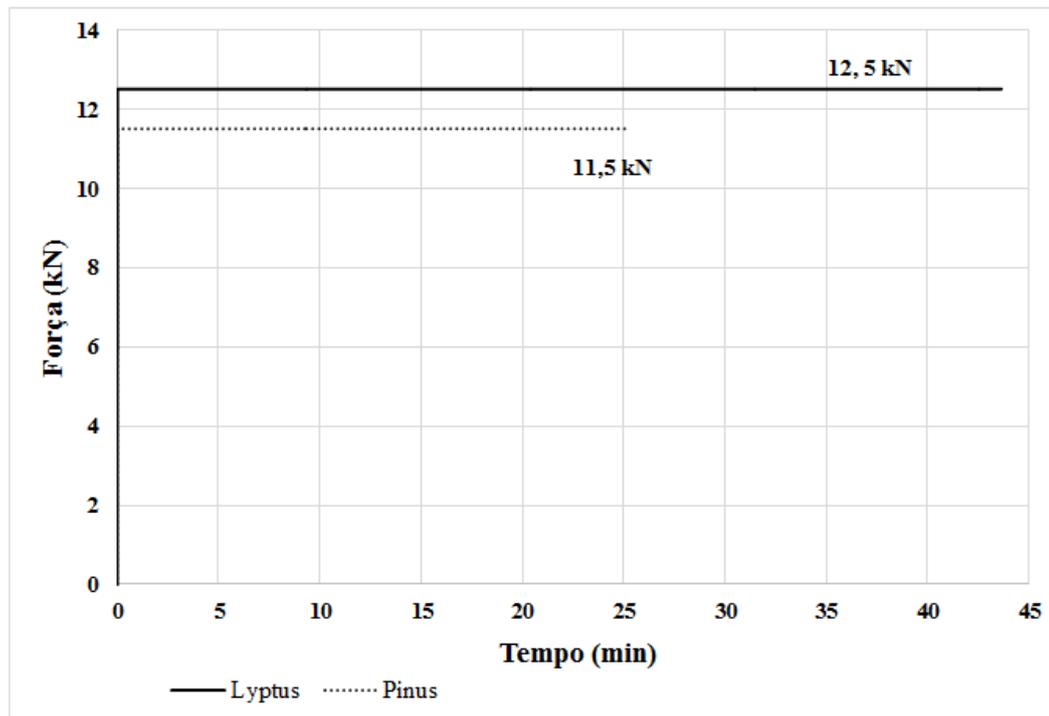


Figura 4.23: Reação da força distribuída para os apoios.

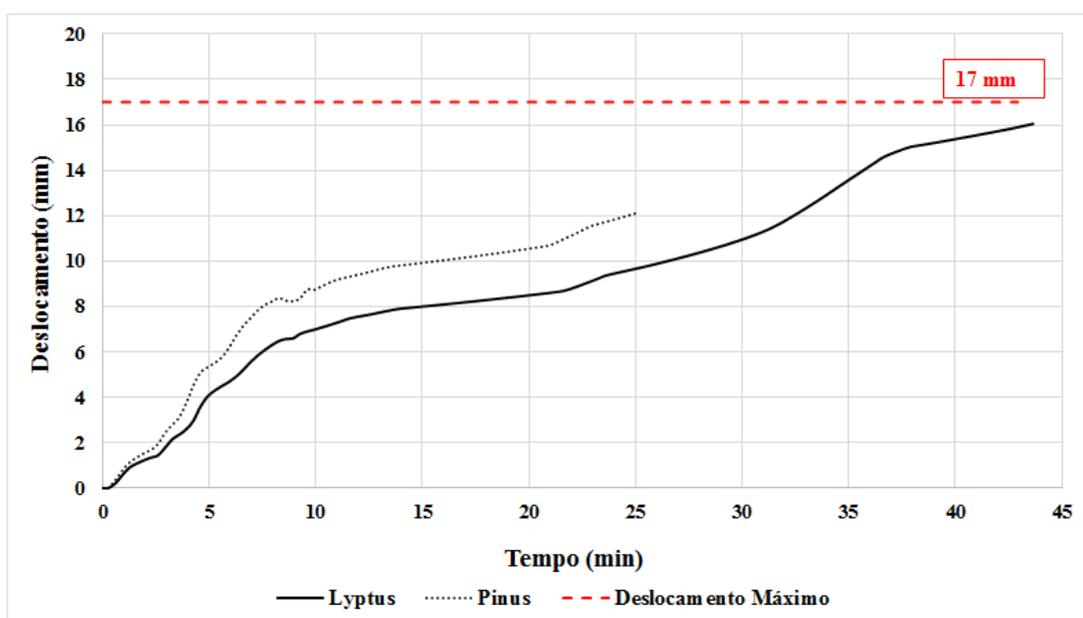


Figura 4.24: Evolução temporal do deslocamento no meio do vão.

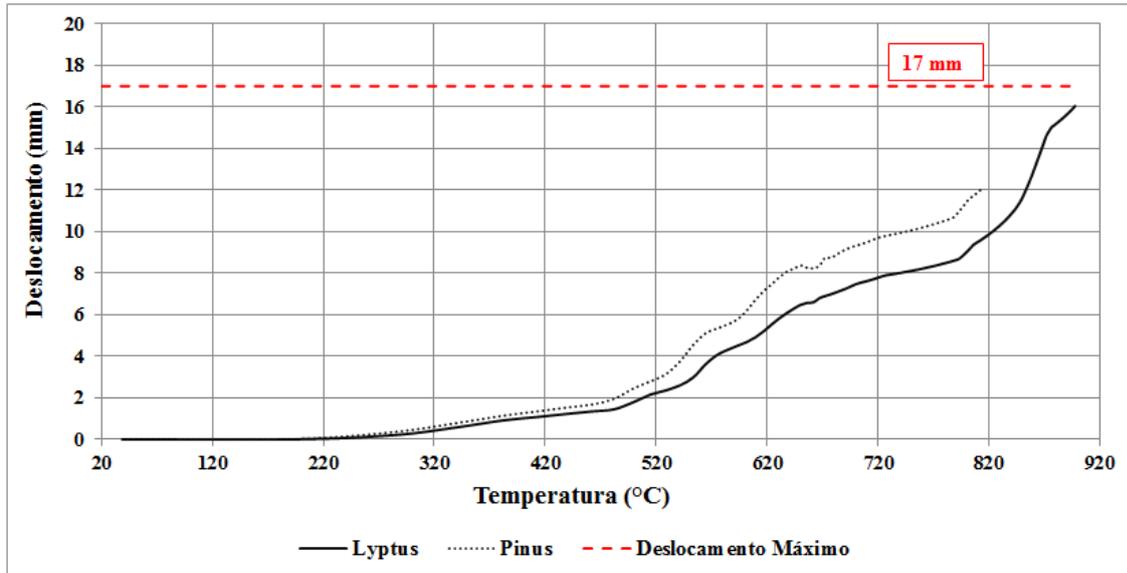


Figura 4.25: Evolução temporal do deslocamento no meio do vão.

A linha constante para o deslocamento máximo em estado limite de serviço é indicada na Figura 4.24, e foi calculada a partir da equação $L/300$, sendo L o vão livre entre apoios ($L = 5100$ mm).

Na Tabela 4.7 os dados obtidos por meio dos modelos numéricos são apresentados. O deslocamento inicial registrado imediatamente após iniciado o carregamento é indicado e desconsiderado para a determinação da flecha máxima.

Tabela 4.7: Dados obtidos a partir do modelo numérico em temperaturas elevadas

Madeira	Carga (kN)	$f = L / 300$ (mm)	Desloc. Inicial (mm)	Duração (min)	Desloc. Final (mm)	Flecha máxima (mm)
Lyptus®	25	17	10	44	26	16
Pinus	23	17	12	26	24	12

O deslocamento inicial ocorrido na viga de Lyptus, sendo igual a 10 mm, foi próximo ao valor obtido depois de aplicado o carregamento no ensaio realizado no forno horizontal, momento antes de ligar os queimadores. Para a viga de Pinus o deslocamento no ensaio foi maior.

Tal comportamento foi obtido devido ao fato de que o ensaio foi representado considerando apenas as propriedades mecânicas (MOE, resistência à compressão e tração) da viga com ligação. Sendo assim considerando uma abordagem simplificada sem modelar os componentes da emenda com a conexão circular.

4.2.2.3. Deficiências da aplicação do Método

Durante o desenvolvimento do trabalho foram realizadas análises para validação das propriedades térmicas aplicadas e discutidas em Martins et al. (2015). Com base nos dados experimentais do trabalho desenvolvido por Harada et al. (2012) confeccionou-se um modelo térmico bidimensional, sendo as dimensões iniciais de 150 mm de largura e a altura igual a 305 mm. A densidade da espécie Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) é igual a 370 kg/m³ e a duração do ensaio em temperaturas elevadas foi de 45 minutos.

Na Figura 4.26 (a) pode se observar o refinamento de malha adotado no modelo numérico, em que a dimensão de cada elemento consiste de 4,69 mm para a largura e de 6,7 mm para a altura. Na investigação experimental realizada por Harada et al. (2012) foram posicionados 6 termopares, como indicado na Figura 4.26 (b). Para a comparação com os valores disponíveis no trabalho de Harada et al. (2012), foi solicitado como resposta da análise numérica, a temperatura nodal (pontos vermelhos na Figura 4.26 (a)), correspondente a posição dos termopares durante os ensaios.

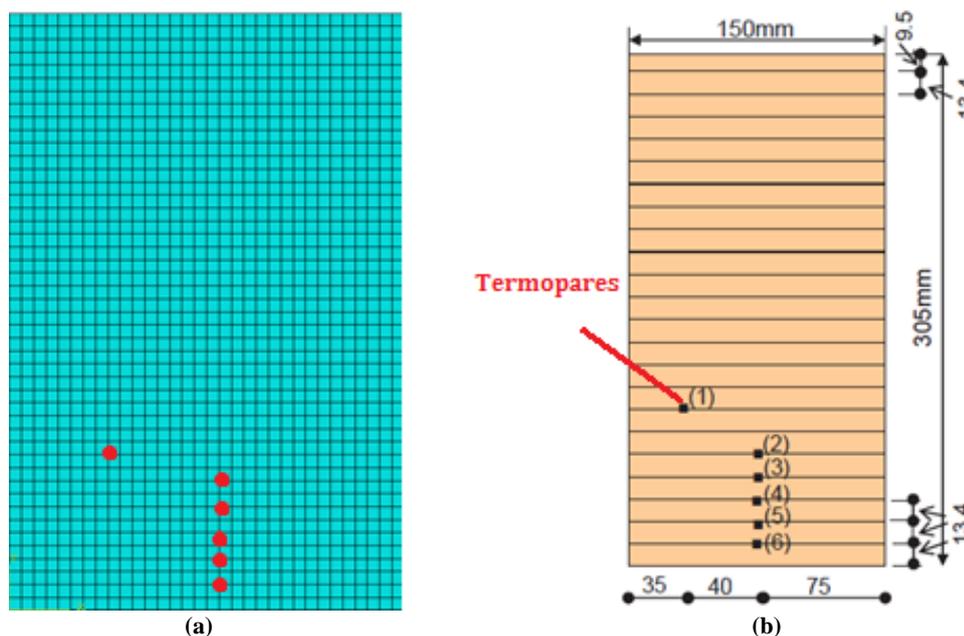


Figura 4.26: Seção transversal do elemento: (a) Modelo Numérico; (b) Layout disponível em Harada et al. (2012)

A seção transversal residual obtida pelo modelo térmico é ilustrada na Figura 4.27, sendo que a região em cinza representa a área carbonizada, na qual as temperaturas resultaram superiores a 300 °C. A partir da avaliação visual de elementos com temperaturas superiores a 300 °C, considerando as dimensões de cada elemento, determinou-se a seção final após 45 minutos de exposição ao fogo, sendo 84 mm de largura e 268 mm de altura.

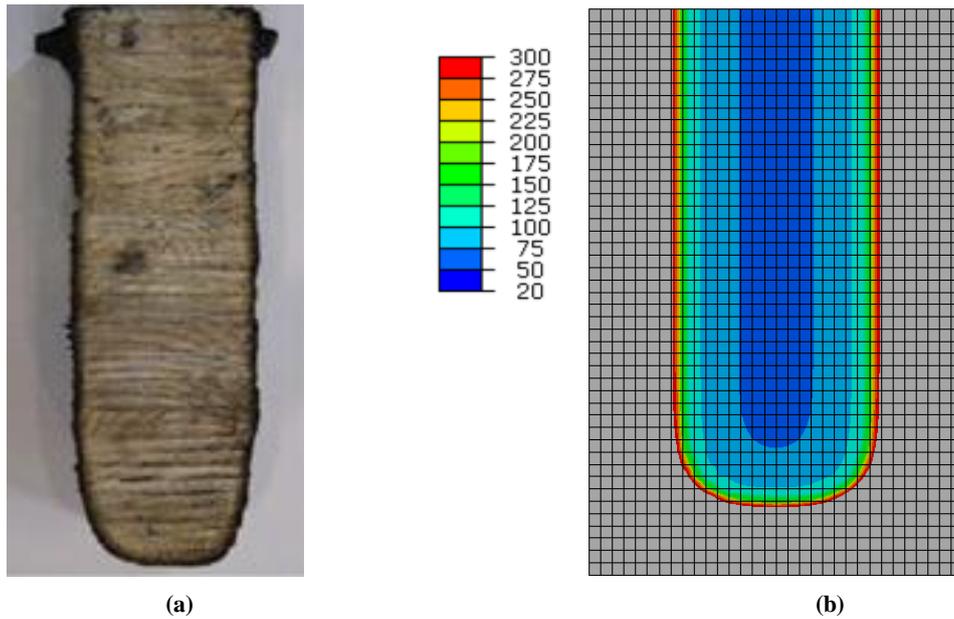


Figura 4.27: Seção transversal residual: (a) Ensaios em grande escala; (b) Modelo Térmico.

Utilizando o pacote computacional Digitizer (Engauge) que converte imagens (gráficos ou mapas), em números se obteve os dados de ensaio das curvas de aquecimento apresentadas na Figura 4.28.a. Na sequência, os dados foram transferidos para o editor de planilhas, conforme Figura 4.28.b, para realização de avaliação comparativa com os resultados obtidos via modelo numérico.

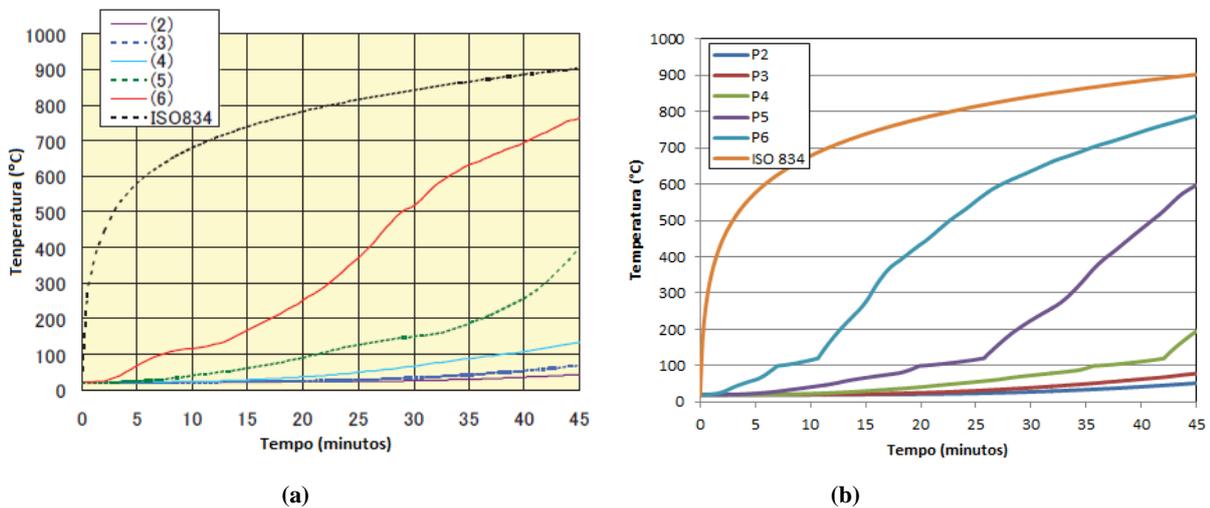


Figura 4.28: Perfil de aquecimento: (a) Dados experimentais; (b) Modelo térmico desenvolvido.

Na Figura 4.29 se apresenta a análise comparativa dos valores experimentais com a resposta obtida via modelo numérico.

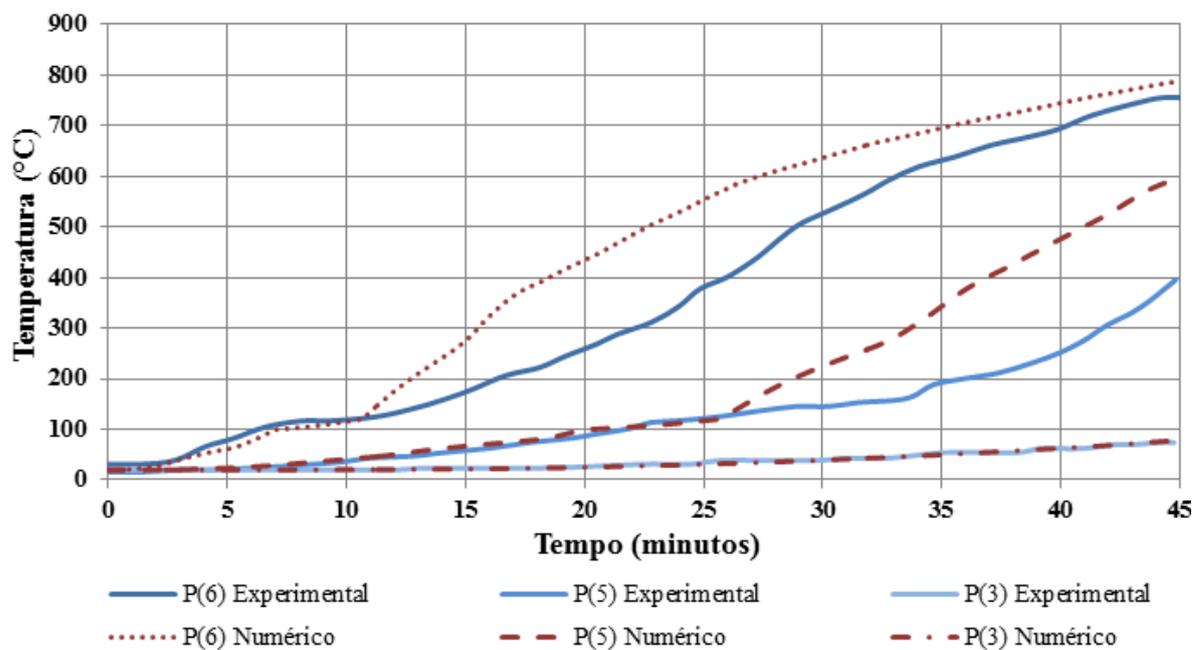


Figura 4.29: Evolução da temperatura por meio do modelo numérico versus o experimental.

O modelo térmico e os dados experimentais apresentam uma boa correlação no início do aquecimento em temperaturas inferiores a 100 °C. Entretanto, a partir deste momento observou-se um distanciamento entre as curvas do experimental e do numérico. Todavia, para a curva de evolução do ponto (6) observa-se que em temperaturas acima de 600°C o comportamento entre o numérico e o experimental tendeu a se aproximar novamente.

Comportamento semelhante foi observado nos modelos desenvolvidos a partir dos dados de ensaios do presente trabalho. Sendo assim, os valores adotados para as propriedades térmicas, que seguem a proposta da Eurocode 5 para método de cálculo avançado, principalmente em relação à condutividade térmica, devem ser estudados com mais ênfase.

Capítulo 5

5. MÉTODOS DE CÁLCULO TEÓRICO PARA A TAXA DE CARBONIZAÇÃO

5.1. Informações Gerais

O desempenho de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio está relacionado à camada carbonizada da madeira, tendo em vista que o carvão gerado pela queima da madeira passa a funcionar como isolante térmico que protege o núcleo ainda íntegro da seção. Desta maneira, vigas e pilares devem ser dimensionados levando-se em consideração que a seção transversal remanescente tenha capacidade de resistir à carga de projeto requerida durante o tempo de exposição ao fogo.

No presente capítulo são apresentados métodos de cálculo propostos em códigos normativos internacionais utilizados como base de dimensionamento para elementos estruturais de MLC em situação de incêndio.

5.2. Determinação da resistência ao fogo – Método de Lie

O primeiro método de cálculo de resistência ao fogo para elementos de MLC, reconhecido em códigos normativos nos países da América do Norte foi proposto por T. Lie em 1977. Para a elaboração do método o autor se baseou parcialmente em resultados de estudos teóricos e resultados de ensaios com vigas e pilares de madeira.

O método de cálculo proposto por Lie (1977) vem sendo adotado em manuais técnicos desde 1984, entre eles: AITC Technical Note 7 (1984), APA EWS Y245 (1998), NDS Technical Report No. 10 – AWS (2014).

No método se assume a taxa de carbonização como sendo 0,60 mm/min (1,42 in/hr), e se considera a redução na resistência e rigidez devido ao aquecimento. O efeito de arredondamento dos cantos da seção é ignorado no método, e assume-se que a seção transversal residual é retangular, como ilustrada na Figura 5.1. O método também é reconhecido na seção 13 do *Handbook of Fire Protection Engineering* publicado pela Associação Nacional de Proteção contra Incêndio (NFPA) em 2008.

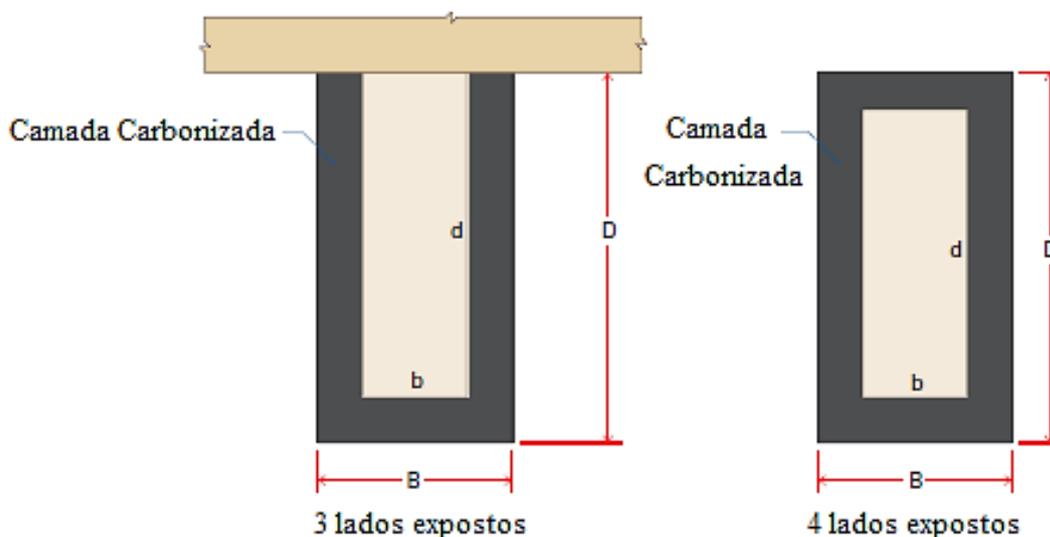


Figura 5.1: Redução da seção transversal do elemento pelo método de Lie. Fonte: Adaptado de TR10 (2014).

Por meio desse método é possível determinar o tempo de resistência ao fogo do elemento, tendo como dados iniciais as dimensões da seção transversal do elemento e assumindo um fator de carregamento (Z), por meio da Equação 5.1 à Equação 5.4, que se encontram listadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Equações propostas por T. T. Lie (1977) para a determinação da resistência ao fogo.

Elementos	Equações	Exposição ao Fogo	
Vigas	$t = 0,1 ZB \left[4 - \frac{B}{D} \right]$	Três (3) faces	Equação 5.1
	$t = 0,1 ZB \left[4 - \frac{2B}{D} \right]$	Quatro (4) faces	Equação 5.2
Pilares	$t = 0,1 ZB \left[3 - \frac{B}{2D} \right]$	Três (3) faces	Equação 5.3
	$t = 0,1 ZB \left[3 - \frac{B}{D} \right]$	Quatro (4) faces	Equação 5.4

Com relação às equações apresentadas na Tabela 5.1, valem:

- B é a largura da viga ou menor dimensão do pilar, em milímetros;
- D é a altura da viga ou maior dimensão do pilar, em milímetros;
- Z é a fator de carregamento, adimensional. Determinado conforme Figura 5.2.

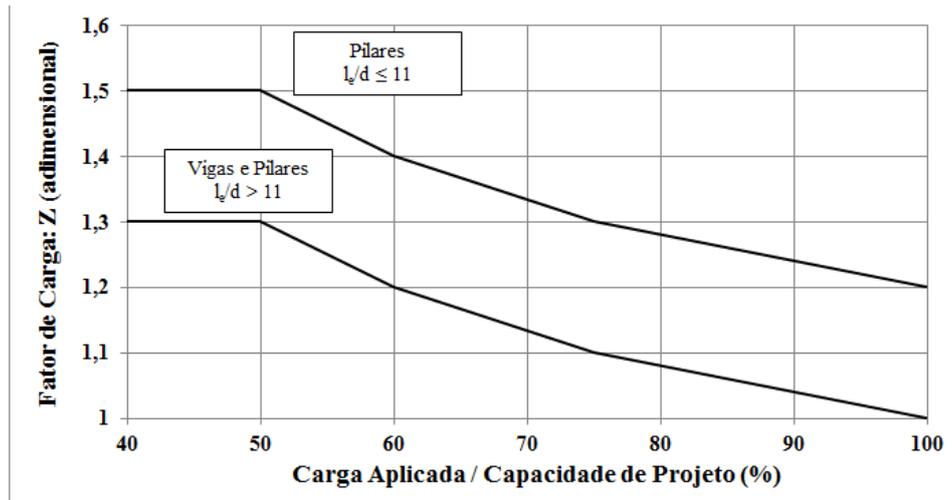


Figura 5.2: Fator de carga (Z) como uma porcentagem da capacidade de projeto.

5.2.1. Aplicação do Método

Os elementos estruturais utilizados durante o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados pelo Método de Lie considerando a exposição ao fogo em três faces por meio da Equação 5.1.

A carência do método está no fato de não se considerar a influência da densidade, sendo que o cálculo considera um valor constante para taxa de carbonização ($\beta = 0,60$ mm/min). Portanto, independe da espécie de madeira utilizada na preparação dos elementos.

Considerou-se 40% da relação entre a carga aplicada e a carga de projeto, e desta maneira, pela Figura 5.2, o fator de carga foi igual a 1,30. Na Tabela 5.2 apresentam-se os dados utilizados para determinação do tempo de resistência ao fogo, bem como a resposta obtida pelo método de cálculo.

Tabela 5.2: Aplicação do método de T. T. Lie (1977)

Dados	Equação	Tempo de Resistência ao fogo
B 150 mm		
D 420 mm	$t = 0,1ZB \left[4 - \frac{B}{D} \right]$	$t = 71$ minutos
Z (40%) 1,30		

Pela Equação 5.1 encontra-se que a resistência ao fogo para as vigas com seção transversal de 150 mm por 420 mm sendo igual a 71 minutos, independente da sua constituição, ou seja, se foi fabricada com madeiras da espécie de *Eucalyptus* ou *Pinus*.

Pela evolução do deslocamento observada durante a realização do ensaio se conclui que considerar a proposta de cálculo de Lie (1977) para a espécie de madeira *Pinus* irá contra a segurança das estruturas de madeira em situação de incêndio.

Para os elementos da espécie de madeira *Pinus* foi determinado por meio de ensaios realizados no presente trabalho valores em torno de 0,95 mm/min e para os elementos de *Lyptus*[®] em torno de 0,67 mm/min, com exposição ao fogo durante 40 minutos. No método de Lie adotou-se o valor da taxa de carbonização sendo 0,60 mm/min, fato que justifica a resposta insatisfatória quando aplicado aos elementos da espécie de madeira *Pinus*.

5.3. Determinação da taxa de carbonização

5.3.1. Método proposto por E. L. Schaffer (1967)

A proposta apresentada em Schaffer (1967) para determinação da taxa de carbonização foi correlacionada à densidade e ao teor de umidade dos elementos por meio de análises de regressão. O modelo foi proposto para três espécies de madeira, sendo: *Douglas fir* (Equação 5.5), *Southern pine* (Equação 5.6) e *White oak* (Equação 5.7).

$$\beta = 1/[(0,002269 + 0,00457u)\rho + 0,331] \quad \text{Equação 5.5}$$

$$\beta = 1/[(0,000461 + 0,00095u)\rho + 1,016] \quad \text{Equação 5.6}$$

$$\beta = 1/[(0,001583 + 0,00318u)\rho + 0,594] \quad \text{Equação 5.7}$$

Sendo,

- β é a taxa de carbonização (mm/min)
- u é o teor de umidade (fração);
- ρ é a densidade da espécie de madeira (kg / m³).

As condições de exposição aplicadas nos testes desenvolvidos em Schaffer (1967) foram baseadas na ASTM E – 119, e cujas constantes foram determinadas por regressão linear a partir de dados dos ensaios.

5.3.2. Método proposto por R. H. White (1988)

A proposta apresentada em White (1988) consiste de um modelo de cálculo não linear para a determinação da taxa de carbonização. Para a elaboração do modelo foram ensaiados elementos de oito espécies de madeira para determinação da taxa de carbonização e propriedades dos materiais (densidade, teor de umidade, coeficiente de difusão, degradação térmica). Os ensaios foram realizados sob a condição de incêndio – padrão estabelecido pela ASTM E-119.

O modelo, representado por meio da Equação 5.8, indica que com o processo de carbonização, a taxa de carbonização diminui gradativamente durante a exposição ao fogo.

$$t = mx^{1,23} \quad \text{Equação 5.8}$$

Com relação à Equação 5.8, valem:

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

A partir de análises de regressão desenvolveu um modelo empírico que relaciona o coeficiente m às propriedades dos materiais, apresentado na Equação 5.9.

$$m = 0,162 + 0,809 \cdot DR + 0,0107 \cdot u + 0,0689 \cdot c - 0,00655 \cdot DR \cdot d - 0,0024 \cdot c \cdot d \quad (R^2 = 0,764) \quad \text{Equação 5.9}$$

Na Equação 5.9, valem:

- DR é a densidade relativa, ou seja, $DR = \rho_{\text{espécie}} / \rho_{\text{água}}$
- u é a percentagem do teor de umidade (%);
- c depende da classificação da espécie. Para coníferas $c = 1$ e folhosas $c = -1$;
- d é a profundidade da penetração do tratamento preservante (em mm).

5.3.3. Norma Australiana AS 1720.4: 1990

A Norma Australiana AS 1720.4 – *Timber Structures – Part 4: Fire-resistance of structural timber members*, propõe para o cálculo da taxa de carbonização a Equação 5.10, que tem como variável a densidade da espécie de madeira.

$$\beta = 0,4 + \left(\frac{280}{\rho}\right)^2 \quad \text{Equação 5.10}$$

Sendo,

β é a taxa de carbonização em mm/min;

ρ é a densidade da espécie de madeira em kg/m³ com teor de umidade a 12%.

Os ensaios para validação da equação foram realizados seguindo as diretrizes da norma AS 1530.4 – *Methods for fire tests on building materials, components and structures – Part 4: Fire-resistance test of elements of construction*.

5.3.4. Norma Europeia EN 1995 – 1 – 2: 2004

A Eurocode 5 - *Design of timber structures – part 1-2: General – Structural fire design*, fornece a Tabela 5.3 com valores constantes para determinação da taxa de carbonização.

A Tabela 5.3 apresenta duas variações para a taxa de carbonização, sendo β_0 a taxa de carbonização em uma direção e β_n a taxa de carbonização que inclui o efeito de arredondamento dos cantos e o surgimento de fissuras.

Tabela 5.3: Valores de taxa de carbonização propostos pela EN 1995-1-2. (continua)

	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Coníferas		
MLC com densidade ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira maciça com densidade ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,80
b) Folhosas		
Madeira maciça ou MLC com densidade de 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira maciça ou MLC com densidade ≥ 450 kg/m ³	0,50	0,55
c) LVL		
Com densidade ≥ 480 kg/m ³	0,65	0,70

Tabela 5.3: Valores de taxa de carbonização propostos pela EN 1995-1-2. (conclusão)

	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
d) Painéis		
Painéis de madeira	0,9 ^a	-
Compensado	1,0 ^a	-
Painéis a base de madeira, além do compensado.	0,9 ^a	-
a: Valores de β válidos para $\rho = 450 \text{ kg/m}^2$ e espessuras de painéis (h_p) de 20 mm. Para outras densidades e espessuras, o valor de β_0 deve ser substituído por $\beta_0 \sqrt{\frac{9000}{\rho_k h_p}}$, com ρ_k em kg/m^3 e h_p em mm.		

5.3.5. Aplicação dos Métodos

Os métodos de cálculo para a determinação da taxa de carbonização foram aplicados considerando os dados obtidos por meio dos ensaios realizados e apresentados no capítulo de análise experimental do presente trabalho.

Na Tabela 5.4 são fornecidos os valores determinados para a densidade (ρ), a duração dos ensaios (t) e a espessura média da camada carbonizada, sendo a média entre a espessura da camada carbonizada nas faces laterais (largura) e na face inferior (altura) do elemento.

Tabela 5.4: Dados necessários para o cálculo da taxa de carbonização

Madeira	ID	Densidade (kg/m^3)	Tempo de Exposição (min)	Espessura média Carbonizada (mm)
Lyptus®	L5	773,2	32	24,8
	L6	784,6	32	21,3
	L4	683,2	40	29,4
	L8	749,2	40	25,6
Pinus	P3	494,6	32	35,2
	P6	499,0	32	35,9
	P7	493,0	40	35,3
	P8	497,5	40	40,95

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores calculados para a taxa de carbonização, incluindo os valores determinados em ensaios.

Tabela 5.5: Taxa de Carbonização determinada a partir dos métodos de cálculo

ID	Tempo de Exposição (min)	Experimental (mm/min)	Schaffer (mm/min)	White (mm ^{1,23} /min)	AS 1720.4 (mm/min)	Eurocode 5 (mm/min)
L5	32	0,78	0,48	1,18	0,53	0,55
L6	32	0,67	0,48	1,17	0,53	0,55
L4	40	0,74	0,52	1,29	0,57	0,55
L8	40	0,64	0,49	1,21	0,54	0,55
P3	32	1,10	0,77	1,32	0,72	0,80
P6	32	1,12	0,77	1,31	0,71	0,80
P7	40	0,88	0,77	1,32	0,72	0,80
P8	40	1,02	0,77	1,31	0,72	0,80

Para a determinação dos valores de taxa de carbonização pelo método apresentado em Schaffer (1967), adotou-se a Equação 5.6 estipulada a partir de dados da madeira da espécie *Southern Pine* (densidade em torno de 520 kg/m³) para representar os elementos preparados com *Pinus*. Para o cálculo dos valores de taxa de carbonização dos elementos de Lyptus[®], aplicou-se a Equação 5.7, que foi determinada a partir de dados da madeira da espécie *White Oak* (densidade em torno de 680 kg/m³).

Como ressaltado anteriormente no capítulo 3, a taxa de carbonização diminui ao longo do tempo de exposição ao fogo e tende a um valor constante, pois a camada carbonizada isola termicamente o núcleo da seção transversal. (Schaffer (1967), White (1988) e Yang et al. (2009b)).

Com os dados obtidos por meio dos ensaios observou-se a diminuição da taxa de carbonização com o aumento do tempo de exposição. Para os métodos de cálculo proposto por Schaffer (1967), AS 1720.4: 1990 e EN 1995-1-2: 2004 a única variável que influencia a taxa de carbonização é a densidade da espécie de madeira, não levando em consideração o tempo que o elemento ficou em exposição ao fogo.

Os valores propostos pela EN 1995-1-2 são baseados em testes realizados com diferentes espécies de madeira utilizadas em território nacional e em exposição à curva de incêndio-padrão da ISO 834. De acordo com testes realizados por Frangi e Fontana (2003), os valores podem ser adotados para elementos expostos ao fogo entre 30 a 110 minutos.

A proposta de Schaffer (1967) baseou-se em testes realizados com três espécies de madeira em exposição à curva de incêndio-padrão estabelecida pela ASTM E-119. White (1988) utilizou um forno vertical de pequenas dimensões sob a curva de incêndio

– padrão da ASTM E-119 para determinar a taxa de carbonização de oito espécies de madeira.

Para validação da equação proposta pela norma AS 1720.4, foram realizados ensaios seguindo as diretrizes da AS 1530.4, que estipula uma curva de aquecimento semelhante a ISO 834.

Na Figura 5.3 é apresentada a relação entre a densidade dos elementos de madeira e a taxa de carbonização determinada a partir dos ensaios e dos métodos de cálculo. Observa-se que os valores obtidos por meio dos ensaios foram maiores do que os encontrados pelos métodos de cálculos.

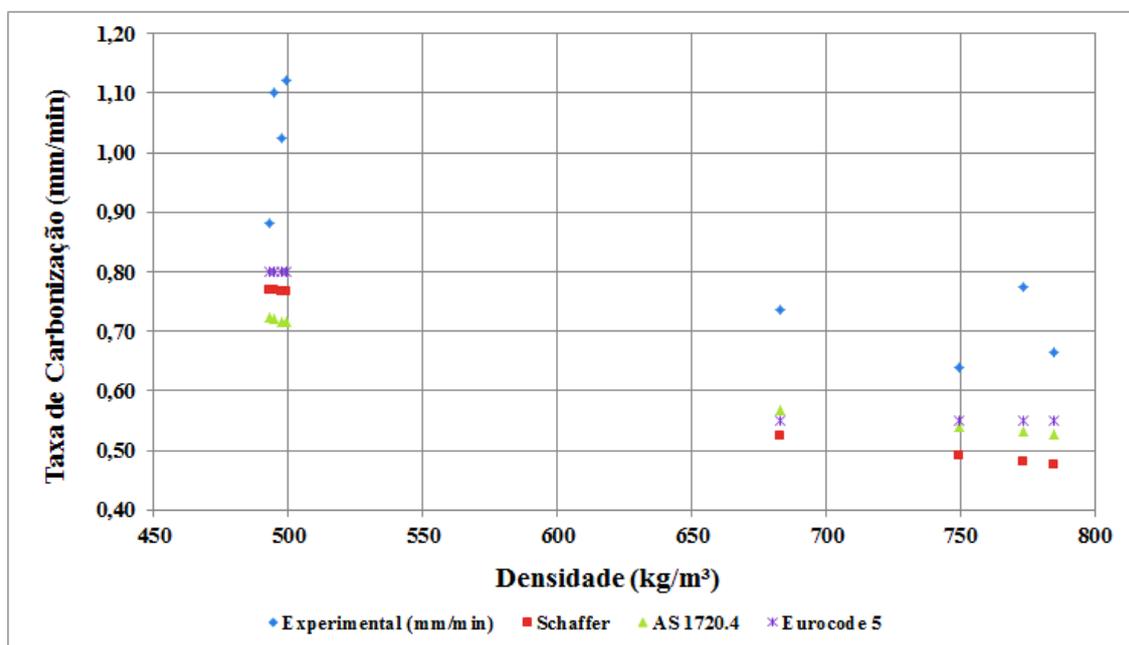


Figura 5.3: Relação entre a taxa de carbonização e a densidade das espécies de madeira.

Na Figura 5.4 são ilustradas as curvas de incêndio-padrão adotadas para o aquecimento durante a elaboração dos métodos de cálculo. O aquecimento do forno horizontal utilizado nos ensaios realizados para o desenvolvimento do presente trabalho foi programado para seguir as diretrizes da ISO 834 e, como se observa na Figura 5.4, apresentou uma boa correlação e permaneceu dentro dos limites de tolerância estipulados pela norma. A curva de aquecimento proposta pela ASTM E119 apresenta um perfil de aquecimento mais lento do que a ISO 834 nos primeiros cinco minutos.

A apresentação da Figura 5.4 tem como finalidade demonstrar que a validação dos métodos propostos por diferentes autores foram realizadas em curvas de aquecimento com comportamentos semelhantes.

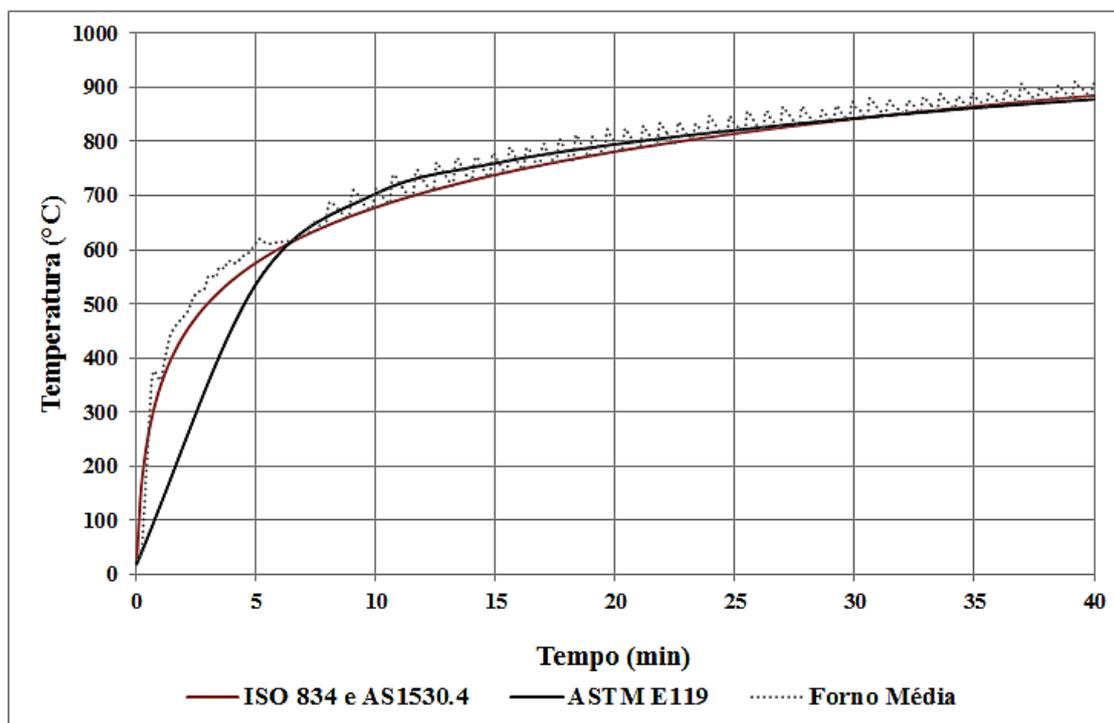


Figura 5.4: Evolução temporal da temperatura de acordo com as normas e dados de ensaio.

5.4. Determinação da Seção Transversal Residual

5.4.1. Método da Seção Transversal Reduzida (MSTR)

Após a exposição ao fogo, as dimensões iniciais da seção transversal do elemento estrutural, no caso, a largura (L) e a altura (H), foram reduzidas para l e h , respectivamente. Na Figura 5.5 ilustra-se a redução da seção transversal. A seção original é retangular. Entretanto os cantos estão sujeitos à transferência de calor em duas direções e, conseqüentemente a carbonização é mais rápida e caracteriza um efeito de arredondamento dos cantos.

De acordo com a EN 1995-1-2, a linha entre a camada carbonizada e a seção remanescente corresponde a temperaturas de aproximadamente 300 °C. Sendo que o interior da seção permanece com a temperatura inicial.

O método da seção transversal reduzida é proposto na Eurocode 5 (EN 1995-1-2) para projetos de dimensionamento de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio, com a finalidade de que a seção, menor do que a original, seja capaz de suportar a carga de projeto devido à margem de segurança adotada nos cálculos.

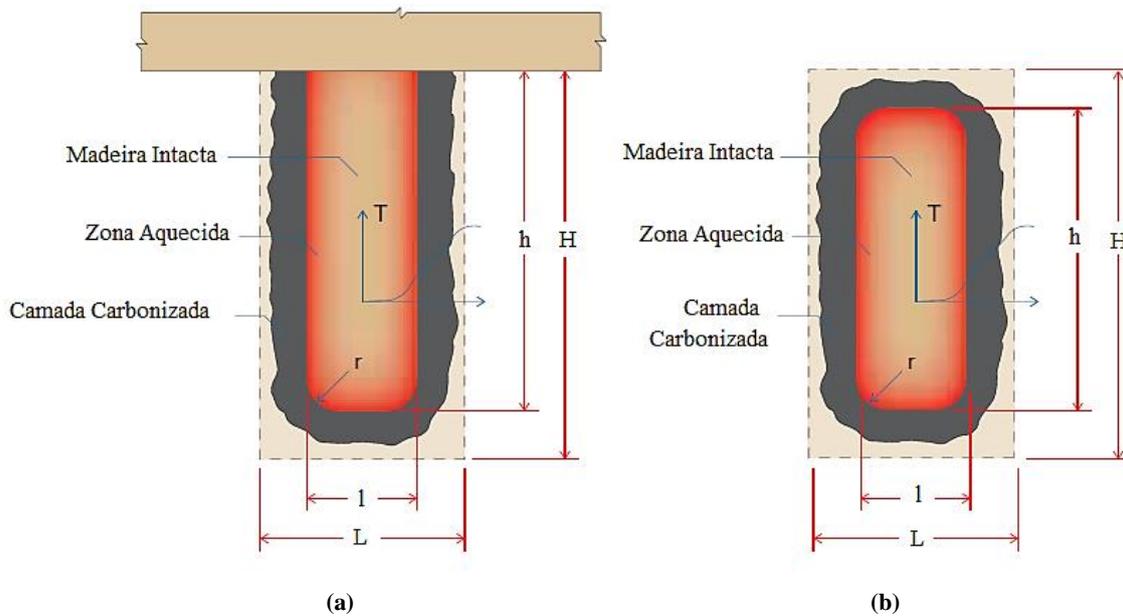


Figura 5.5: Redução das dimensões da seção transversal: (a) Exposição em três faces; (b) Exposição em quatro faces. Fonte: adaptado TR10 (2003).

O método considera a redução da resistência e rigidez sob a camada carbonizada pela adição de uma camada adicional com propriedades mecânicas nulas, e não contribui na resistência da seção transversal residual, sendo a camada adicional um dos principais parâmetros para projetos de dimensionamento em situação de incêndio.

A seção transversal efetiva pode ser calculada pela redução da seção transversal inicial por uma espessura carbonizada efetiva, calculada por meio da Equação 5.11 e ilustrada na Figura 5.6.

$$e_{ef} = e_{char,n} + k_0 e_0 \quad \text{Equação 5.11}$$

onde:

- e_0 é igual a 7 mm;
- $e_{carb,n}$ é a espessura carbonizada, calculada de acordo com a Equação 5.13.
- k_0 é igual a 1 se tempo de exposição for maior ou igual a 20 minutos; se for menor do que 20 minutos, então $k_0 = t/20$

A espessura carbonizada (e_{carb}) deve ser calculada sendo a posição da linha carbonizada levando em conta a duração da exposição ao fogo e a taxa de carbonização.

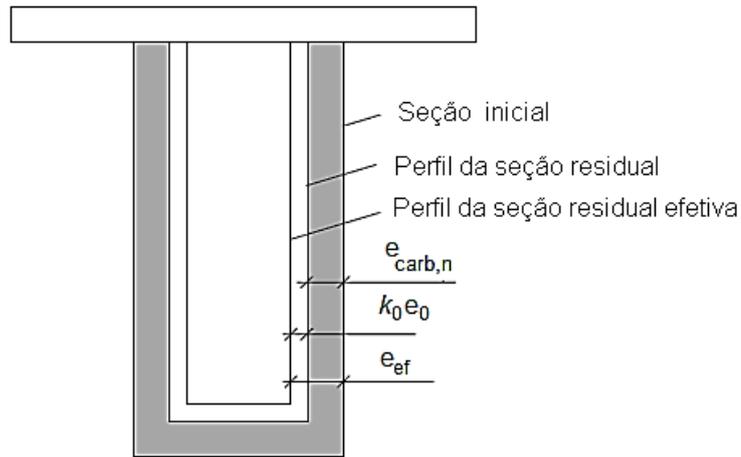


Figura 5.6: Detalhes da seção residual de acordo com o método proposto pela EN 1995-1-2.

Pelo Eurocode 5 são considerados dois tipos de exposição, no caso, a carbonização em uma direção que resulta em uma camada carbonizada denominada, $e_{carb,0}$, ilustrada na Figura 5.7 (a), bem como a carbonização em duas direções que resulta em uma camada carbonizada incluindo o efeito de arredondamento dos cantos denominada, $e_{carb,n}$, ilustrada na Figura 5.7 (b).

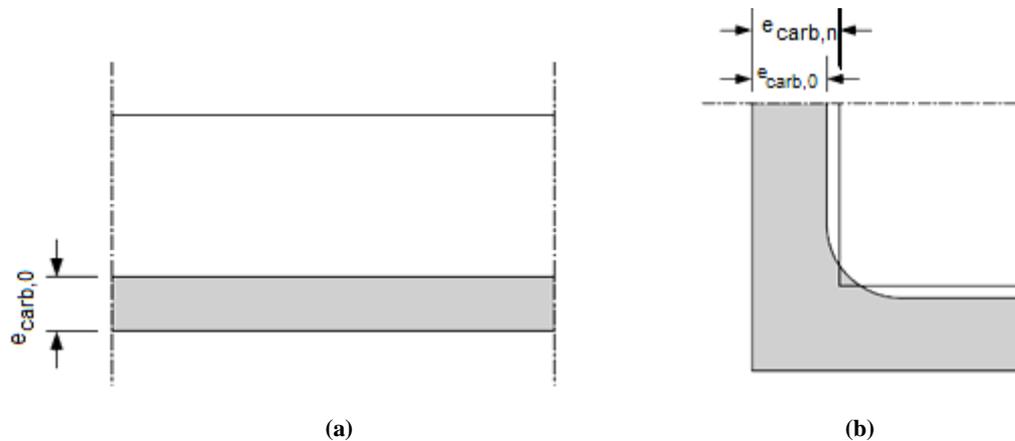


Figura 5.7: Ilustração da espessura carbonizada: (a) uma direção; (b) duas direções.

Calcula-se a espessura carbonizada unidimensional pela Equação 5.12, e considerando o efeito do arredondamento dos cantos pela Equação 5.13.

$$e_{carb,0} = \beta_0 \cdot t \quad \text{Equação 5.12}$$

$$e_{carb,n} = \beta_n \cdot t \quad \text{Equação 5.13}$$

Com relação Equação 5.12 e Equação 5.13, valem:

- β_0 é a taxa de carbonização para exposição ao fogo em uma direção (Tabela 5.3);

- β_n é a taxa de carbonização para exposição ao fogo considerando o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras (Tabela 5.3);
- t é a duração de exposição ao fogo (min).

A seção transversal residual deve ser determinada pela subtração da espessura efetiva calculada em todas as faces do elemento que foram expostas ao fogo.

A norma Australiana AS 1720.4: 1990 também adota o cálculo da espessura efetiva de carbonização para determinação da seção residual remanescente, entretanto há uma pequena alteração no cálculo, apresentado pela Equação 5.14.

$$e_{ef} = e_{char,n} + 7,5 \quad \text{Equação 5.14}$$

5.4.2. Aplicação do Método

Aplicou-se o Método da Seção Transversal Reduzida (MSTR) a partir dos dados dos elementos estruturais utilizados no trabalho. Os valores de taxa de carbonização determinados pelos métodos teóricos de cálculo e apresentados na Tabela 5.5 foram aplicados na Equação 5.12 e Equação 5.13. A Equação 5.14 foi aplicada para a determinação das espessuras da camada carbonizada a partir da taxa de carbonização estipulada pela norma AS 1720.4 (1990).

A Tabela 5.6 apresenta as espessuras carbonizadas, bem como as espessuras efetivas que consideram a adição da camada com resistência nula.

Tabela 5.6: Espessura carbonizada e espessura efetiva. Dimensões em milímetros.

ID	Duração (min)	Experimental		Schaffer		AS 1720.4		Eurocode 5	
		e_{carb}	e_{ef}	e_{carb}	e_{ef}	e_{carb}	e_{ef}	e_{carb}	e_{ef}
L5	32	22,6	27,0	15,4	22,4	17,0	24,5	17,6	24,6
L6		19,6	23,0	15,2	22,2	16,9	24,4	17,6	24,6
L4	40	24,6	34,2	21,0	28,0	18,2	25,7	17,6	24,6
L8		23,9	27,3	19,7	26,7	17,3	24,8	17,6	24,6
P3	32	34,9	35,5	24,6	31,6	23,1	30,6	25,6	32,6
P6		34,1	37,6	24,6	31,6	22,9	30,4	25,6	32,6
P7	40	36,6	34,0	30,8	37,8	23,1	30,6	25,6	32,6
P8		37,1	44,8	30,7	37,7	22,9	30,4	25,6	32,6

A Tabela 5.7 apresenta as dimensões das seções transversais residuais determinadas com a subtração da espessura efetiva da dimensão inicial do elemento. As

dimensões designadas como experimental considerou o valor médio da taxa de carbonização obtida por meio dos ensaios.

Tabela 5.7: Seção Transversal a partir do MSTR. Dimensões em milímetros.

ID	Duração (min)	Experimental		Schaffer		AS 1720.4		Eurocode 5	
		L (mm)	H (mm)	L (mm)	H (mm)	L (mm)	H (mm)	L (mm)	H (mm)
L5	32	104,7	393,0	105,2	397,6	101,0	395,5	100,8	395,4
L6		110,8	397,0	105,5	397,8	101,2	395,6	100,8	395,4
L4	40	100,8	385,8	94,0	392,0	98,7	394,3	100,8	395,4
L8		102,3	392,7	96,6	393,3	100,5	395,2	100,8	395,4
P3	32	80,1	384,5	86,8	388,4	88,9	389,4	84,8	387,4
P6		81,9	382,4	86,9	388,4	89,2	389,6	84,8	387,4
P7	40	76,8	386,0	74,4	382,2	88,8	389,4	84,8	387,4
P8		75,8	375,2	74,6	382,3	89,1	389,6	84,8	387,4

Pelo MSTR considera a espessura carbonizada em todas as faces sendo igual, entretanto, pela análise experimental observa-se que a carbonização na face inferior é maior do que nas laterais.

Devido os valores para as taxas de carbonização das espécies de madeiras obtidos nas análises realizadas por meio dos ensaios serem maiores do que os valores obtidos por meio dos métodos de cálculos, então a seção transversal residual é menor.

Portanto, adotar os valores obtidos para a taxa de carbonização pelos métodos de cálculos internacionais ao se realizar dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio com a utilização de espécies nacionais pode levar a propostas contra risco a segurança.

Capítulo 6

6. CONCLUSÕES

Duas espécies de madeira foram utilizadas para a preparação de elementos estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC), sendo: *Eucalyptus* (Lyptus[®]), com densidade média sendo igual a 743 kg/m³ e classe de resistência C60, e *Pinus*, com densidade média igual a 505 kg/m³ e classe de resistência C30. O trabalho teve como objetivo avaliar a influência da densidade e propriedades mecânicas das espécies nos valores de taxa de carbonização e no desempenho estrutural dos elementos de Madeira Laminada Colada.

6.1. Análise Experimental

As peças de madeira da espécie de *Pinus* foram cedidas pela empresa Berneck, localizada no estado de Santa Catarina. A produção dos elementos foi executada pela construtora ITA, empresa localizada no estado de São Paulo, sob rigoroso controle de qualidade, e o tratamento por imersão foi realizado pela empresa Montana Química S.A.

6.1.1. Avaliação da Taxa de Carbonização

A partir dos elementos estruturais de MLC, foram realizados três ensaios para avaliação da taxa de carbonização das espécies de madeira, sendo que em cada teste um conjunto com quatro elementos foram expostos ao fogo. O primeiro teste, com duração de ensaio de 32 minutos, foi constituído de dois elementos de Lyptus[®] e dois de *Pinus*. O segundo teste, com exposição ao fogo durante 40 minutos, também foi realizado com ambas as espécies de madeira. O último teste foi constituído de elementos de madeira de *Pinus* que receberam tratamentos preservantes por imersão prolongada, sendo MOQ[®] OX 50-CCB-O (tratamento ignífugo) e OSMOGUARD[®] FR 100 (retardantes ao fogo).

Foi observado que a taxa de carbonização tende a diminuir com o aumento do tempo de exposição ao fogo, o que foi observado pelos valores determinados em ensaios. Observou-se que a carbonização na face inferior foi maior do que nas faces laterais.

O valor médio da taxa de carbonização entre a face inferior e as faces laterais para o elemento de Lyptus[®] depois de exposto ao fogo durante 32 minutos foi igual a 0,74 mm/min, enquanto que com o aumento do tempo de aquecimento para 40 minutos, o valor diminuiu para 0,67 mm/min.

Para os elementos preparados com madeira da espécie de *Pinus*, depois de exposto ao fogo durante 32 minutos a taxa de carbonização foi igual a 1,1 mm/min, enquanto que com o tempo de aquecimento de 40 minutos o valor diminuiu para 0,95 mm/min.

Os tratamentos preservantes aplicados nos elementos de *Pinus* apresentaram um bom desempenho retardando o processo de carbonização e, conseqüentemente resultaram em valores menores para a taxa de carbonização, sendo 0,72 mm/min para os elementos tratados com OSMOGUARD[®] FR 100 e 0,71 mm/min em elementos imersos em MOQ[®] OX 50-CCB-O.

O produto ignífugo MOQ[®] OX 50-CCB-O não tem como finalidade de uso a proteção contra fogo, e sim, destina-se a tratamento contra ataque de insetos xilófagos. Entretanto, o resultado final da seção transversal após 30 minutos de exposição ao fogo indica que ocorreu uma diminuição em torno de 37% no processo de carbonização ao se comparar com os elementos sem tratamento expostos ao fogo durante 32 minutos. Além disso, a seção residual apresentou diversas fissuras, e ao longo do comprimento da face inferior e foi observada uma rachadura com 15 mm de profundidade ao longo de todo o comprimento.

Ao contrário do que ocorreu nos elementos sem tratamento preservantes, a carbonização nas vigas tratadas com OSMOGUARD[®] FR 100 foi maior nas faces laterais do que na face inferior. Tais elementos apresentaram uma redução de 35% no processo de carbonização ao se comparar com os elementos sem tratamento, e a seção transversal residual não apresentou fissuras ou rachaduras.

Ao se comparar os dois tipos de tratamento não se observou uma diferença significativa em relação ao valor de carbonização. Entretanto, devido ao surgimento de fissuras e rachaduras que surgiram nos elementos tratados com produto ignífugo não foi possível garantir que a capacidade resistente dos elementos fosse semelhante.

Por meio dos termopares instalados no interior da seção transversal registrou-se a evolução temporal da temperatura. A degradação térmica da madeira, como observado em diversos trabalhos, produziu uma camada carbonizada que protegeu o interior da seção e retardou o fluxo de calor, sendo que, enquanto termopares instalados próximos à

face externa indicavam temperaturas em torno de 500 °C, e no interior da madeira registrou-se temperaturas inferiores a 30 °C. Os elementos de *Pinus* apresentaram um acréscimo de temperatura mais rápido do que os elementos preparados com a madeira da espécie de *Lyptus*[®].

Como principal contribuição pode se considerar a significativa influência da densidade na taxa de carbonização, sendo que quanto maior a densidade, mais lenta será o avanço da camada carbonizada.

Para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio, levando-se em consideração que a taxa de carbonização tende a um valor constante ao longo do período de exposição ao fogo, sugere-se adotar os valores determinados nos ensaios com tempo de aquecimento de 40 minutos.

Portanto, para elementos preparados com madeira de *Lyptus*[®] recomenda-se a taxa de carbonização igual a 0,67 mm/min, e para o *Pinus* 0,95 mm/min.

Para diminuir a velocidade do processo de carbonização dos elementos fabricados com madeira da espécie *Pinus*, aconselha-se o uso do produto retardantes de chamas OSMOGUARD[®] FR 100, considerando-se para o dimensionamento uma taxa de carbonização igual a 0,72 mm/min.

6.1.2. Análise Termestrutural

Realizou-se a análise dos elementos estruturais de madeira em temperaturas elevadas considerando-se a aplicação simultânea de uma força concentrada, com a finalidade de determinar a resistência ao fogo das vigas de MLC preparadas com madeiras de *Lyptus*[®] e *Pinus*.

A flecha máxima permitida no estado limite de serviço foi determinada como sendo igual a $L/300 = 17$ mm, considerando o vão estabelecido no ensaio, e calculado de acordo com a PN NBR 7190: 2013 para temperatura ambiente. A viga de *Pinus* alcançou o deslocamento máximo decorrido 21 minutos de exposição ao fogo, enquanto que a viga de *Lyptus*[®] ficou em exposição ao fogo durante 44 minutos até alcançar o limite estabelecido.

Com a verificação de resistência mecânica dos elementos após a carbonização e resfriamento, realizada de acordo com a ABNT NBR 5628: 2001, o tempo de aquecimento considerado para resistência ao fogo do elemento de *Lyptus*[®] foi reduzido

em 80%, enquanto para os elementos de Pinus permaneceu o próprio tempo de aquecimento, pois não ocorreu ruptura ao ser reaplicada a carga de ensaio.

Comparando o Módulo de Elasticidade obtido a partir das vigas carbonizadas, em relação ao determinado antes do ensaio em temperaturas elevadas, o elemento estrutural de madeira Lyptus[®] apresentou redução de 49,5%, para este parâmetro, enquanto o elemento preparado com a madeira da espécie de Pinus reduziu o módulo de elasticidade em torno de 31%. Todavia, se devem levar em consideração que os elementos de Lyptus[®] permaneceram em exposição ao fogo por um tempo superior às vigas de Pinus, e conseqüentemente resultou em uma seção transversal residual menor diminuindo a sua capacidade resistente.

Portanto, conclui-se que a menor resistência ao fogo da viga fabricada com madeira de Pinus não ocorreu devido apenas à taxa de carbonização da espécie ser maior, e a conseqüente redução da seção transversal, mas sim, em resposta à diferença entre as propriedades mecânicas das espécies estudadas.

6.2. Análise Numérica

Uma sequência de análise térmica e mecânica foi desenvolvida para verificar a aplicação do método de cálculo avançado proposto pela EN 1995-1-2: 2004. A estratégia numérica adotada foi baseada no trabalho desenvolvido por Klippel (2014).

6.2.1. Modelo Bidimensional

O modelo bidimensional foi executado para avaliação da taxa de carbonização, sendo cada elemento ensaiado representado pela sua respectiva densidade e tempo de exposição ao fogo.

Os resultados apresentaram um pequeno aumento da taxa de carbonização em relação ao aumento da duração da exposição ao fogo. Fato que não é validado pelos resultados obtidos por meio das análises das seções transversais residuais obtidas nos ensaios e em trabalhos realizados por outros autores, como Schaffer (1967) e Yang et al (2009b).

Todavia, a influência da densidade da espécie pode ser observada nos valores de taxa de carbonização, ou seja, quanto maior a densidade menor a taxa de carbonização.

Os elementos de Pinus apresentaram temperaturas maiores do que as encontradas no interior dos elementos de Lyptus®.

Nos modelos desenvolvidos observou-se boa correlação no início do aquecimento para temperaturas inferiores a 100 °C, entretanto a partir deste momento observou-se um distanciamento entre as curvas de aquecimento para os pontos no interior do modelo experimental em relação ao modelo numérico.

Portanto, os valores adotados para as propriedades térmicas propostos pela Eurocode 5, principalmente em relação à condutividade térmica devem ser reavaliados ao serem aplicados.

6.2.2. Modelo Tridimensional

O modelo tridimensional foi realizado para avaliação da influência da temperatura no desempenho estrutural de elementos de Madeira Laminada Colada. As relações de dependência entre a elevação da temperatura e as propriedades mecânicas do material foram aplicadas conforme a proposta da EN 1995-1-2: 2004.

Inicialmente, o modelo térmico foi realizado tendo como dados de entrada a curva de aquecimento registrada pelos termopares do interior do forno. Em seguida, os resultados de distribuição de temperatura ao longo do elemento foram utilizados como dados de entrada para a avaliação estrutural.

No modelo numérico foi possível observar a diferença no desempenho estrutural entre as duas espécies de madeiras que possuem propriedades mecânicas bem distintas. Em relação à viga de Lyptus®, os valores obtidos para o deslocamento inicial e a flecha máxima foram próximos ao estipulado por meio dos ensaios. Todavia, a viga preparada com madeira da espécie Pinus apresentou deformações maiores na análise experimental.

O comportamento distinto entre as análises numérica e experimental pode ter ocorrido devido ao fato de que no modelo numérico não foi representada a emenda realizada com conexão circular, tendo maior influência nas vigas preparadas com a madeira de Pinus.

6.3. Métodos Teóricos

Os métodos de cálculos disponíveis em códigos normativos internacionais foram aplicados levando-se em consideração dados sobre as propriedades físicas e mecânicas

das madeiras de espécie brasileira sem considerar a aplicação de tratamentos preservantes.

6.3.1. Determinação da Resistência ao Fogo

O método de T. T. Lie (1977) adotado em manuais técnicos em países como Estados Unidos e Canadá propõe equações para a determinação do tempo de resistência ao fogo de elementos de MLC.

A carência do método está no fato de não considerar a influência da densidade, sendo que o cálculo considera um valor constante para taxa de carbonização ($\beta = 0,60$ mm/min). Portanto, independe da espécie de madeira utilizada na preparação dos elementos, e conseqüentemente, de acordo com o método, os elementos estruturais analisados no presente trabalho deveriam apresentar capacidade resistente semelhante, pois a seção transversal inicial possui as mesmas dimensões.

6.3.2. Determinação da Taxa de Carbonização

Para a determinação da taxa de carbonização foram considerados quatro modelos de cálculos disponíveis na literatura, que levam em consideração a densidade das espécies de madeira e teor de umidade dos elementos.

Para a aplicação do método de cálculo de Schaffer (1967) foi utilizada a equação determinada a partir de dados da espécie Southern pine para o cálculo da taxa de carbonização da madeira de espécie Pinus, e a equação designada para a madeira de Lyptus[®] foi baseada nos dados da espécie *White Oak*, com valores médios determinados de 0,77 mm/min e 0,49 mm/min, respectivamente, para as madeiras de Pinus e Lyptus[®].

O modelo de cálculo não linear de R. H. White (1988) leva em consideração a classificação da espécie em coníferas ou folhosas, bem como possibilita a consideração da profundidade de penetração do tratamento preservante. O valor médio determinado para a madeira de Lyptus[®] foi igual a $1,21 \text{ mm}^{1,23}/\text{min}$, enquanto que para a espécie de Pinus foi igual a $1,32 \text{ mm}^{1,23}/\text{min}$.

Pelo método de cálculo disponível na norma australiana AS 1720.4: 1990 foram determinados os valores médios de 0,54 mm/min para as madeiras de Lyptus[®], e 0,72 mm/min para as madeiras da espécie *Pinus*.

A Eurocode 5 fornece valores constantes levand-se em consideração apenas a densidade da espécie de madeira. O valor proposto para a madeira de Lyptus[®] (folhosas

com densidades superiores a 450 kg/m^3) é $0,55 \text{ mm/min}$, enquanto que para a espécie de *Pinus* (coníferas densidades superiores a 290 kg/m^3) é $0,80$. Tais valores consideram o efeito do arredondamento dos cantos e surgimento de fissuras.

A duração da exposição ao fogo não consta como dados de entrada nos cálculos, sendo os valores determinados considerados constantes. Como se observou pelos dados dos ensaios, a degradação térmica foi maior depois de iniciada a carbonização e com o avanço da camada carbonizada a taxa de carbonização tendeu a diminuir. Segundo Schaffer (1977), White (1988) e Yang et al. (2009.b), a taxa de carbonização tende a um valor constante após um determinado tempo de exposição ao fogo.

Os testes realizados por Frangi e Fontana (2003) para validação da proposta da Eurocode 5, indicaram que os valores podem ser adotados para elementos expostos ao fogo entre 30 a 110 minutos. Sendo assim, é mais adequado adotar os valores constantes determinados pelos métodos de cálculo se for considerado um tempo de aquecimento superior a 30 minutos.

Considerando os valores médios determinados nos ensaios com duração de 40 minutos, tem-se para a madeira de *Lyptus*[®] a taxa de carbonização igual a $0,69 \text{ mm/min}$ e para a madeira da espécie *Pinus* valores próximos a $0,95 \text{ mm/min}$.

Pode-se notar pelos resultados apresentados que os valores para taxa de carbonização das espécies de madeiras ensaiadas foram maiores do que os valores propostos em códigos internacionais, portanto ao se aplicar o método da seção transversal reduzida encontram-se seções residuais menores do que quando se utiliza valores teóricos. Sendo assim, ao se adotar os valores obtidos para a taxa de carbonização pelos métodos de cálculos internacionais para realizar dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio com espécies nacionais pode levar a propostas contra a segurança, por estar considerando uma maior seção resistente do que encontrada na prática.

6.4. Sugestões para trabalhos futuros

A base fundamental para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio é a aplicação do método da seção transversal reduzida, sendo que, com a degradação térmica da madeira as dimensões dos elementos diminuem de acordo com a taxa de carbonização que depende da espécie de madeira, e portanto diminui a capacidade resistente.

A conclusão principal do presente trabalho se dá no fato de que utilizar os valores propostos para taxa de carbonização a partir de códigos normativos internacionais leva a resultados contra a segurança estrutural.

Portanto, faz-se necessário realizar um estudo com um maior número de amostras e diferentes espécies de madeira utilizadas no mercado nacional, tendo como finalidade elaborar uma tabela como a fornecida pela EN 1995-1-2: 2004 ou um modelo de taxa de carbonização, como proposto pelo AS 1720.4:1990, a fim de suprir as carências da atual norma brasileira de dimensionamento de estruturas de madeira.

Faz-se necessário um estudo aprofundado sobre as propriedades térmicas para aplicação nos modelos a serem desenvolvidos em pacotes computacionais, com determinação experimental da condutividade térmica e calor específico.

Por fim, realizar análises numéricas para verificação da influência na taxa de carbonização de parâmetros, como calor específico, condutividade térmica e emissividade (valores diferentes para cada espécie)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **NBR 9442**: Índice de propagação de chamas. Rio de Janeiro.

_____ (2000). **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro.

_____ (2001). **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro.

_____ (1997). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

AGUILLAR FILHO D. (1986). **Combustibilidade e tratamento ignífugos da madeira**. 99f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, 1986.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. (1984). AITC TECHNICAL NOTE 7. **Calculation of fire resistance of glued laminated timbers**. Englewood.

APA Nº EWS Y245 (1998). Technical note: **Calculation fire resistance of glulam beams and columns**. Revisão Dezembro 2009. Disponível em: <
<http://www.drjlumber.com/wp-content/uploads/2014/07/Calculating-Fire-Resistance.pdf>>

ASSOCIATION SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2010). **ASTM E119**: standard test methods for fire tests of building construction and materials. Philadelphia.

_____ (2005). **ASTM D5266-99**: Standard practice for estimating the percentage of wood failure in adhesive bonded joints. West Conshohocken, PA.

_____ (2007). **ASTM D7247**: Standard test method for evaluating the shear strength of adhesive bonds in laminated wood products at elevated temperatures. West Conshohocken, PA.

_____ (2013). **ASTM D905-8**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken, PA.

_____ (2012). **ASTM D2559**. Standard specification for adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. West Conshohocken, PA.

_____ (2014). **ASTM D4688**. Standard test method for evaluation structural adhesives for finger jointing lumber. West Conshohocken, PA.

_____ (2015a). **ASTM E662**. Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials. West Conshohocken, PA.

AUSTRALIAN STANDARD (2005). **AS 1530.4**: Methods for fire tests on building materials, components and structures – Part 4: Fire-resistance test of elements of construction. Homebush.

_____ (2006). **AS 1720.4**. Timber Structures – Part 4: Fire resistance of structural timber members. Homebush.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. (1993) **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing Company. 2 ed. 712 p.

CACHIM, P. B; FRANSSEN, J-M. (2009). **Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5**. Fire & Materials. Vol. 33. P. 129-143.

CALIL NETO, C. (2011). Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos.

CNS STANDARD. (2002). **CNS 12514: Fire resistant examination for building structural element**. Bureau of standards. Metrology and Inspection, Ministry of Economic Affairs (MOEA), Taipei, Taiwan.

COLLIER, P. C. R. (1992). **Charring rates of timber. Building Research Association of New Zealand**. Study Report SR 42. Judgeford, New Zealand.

DEGIOVANI, A. S. E; SEGUNDINHO, P.G.A.; CALIL JUNIOR, C. (2011). **Comportamento da linha de cola em madeira laminada colada (MLC) sob altas temperaturas**. Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia. São Carlos, v. 12, n. 30, p. 31-48, set.

DEUTSCHE NORM – EUROPEAN STANDARD. (1995). **EN 391**. Glued Laminated timber – Delamination test of glue lines. Berlin.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (1993). **EN 314**. Plywood. Bonding quality: test methods. Brussels, Belgium.

_____ (2002). **EN 1991-1**. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels, Belgium.

_____ (2005). **EN 1993-1**. Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium.

_____ (2005). **EN 1994-1**. Design of steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structures fire design. Brussels, Belgium.

- _____ (2004). **EN 1995-1**. Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels, Belgium.
- _____ (2008). **EN 15425**. Adhesives – one component polyurethane ofr load bearing timber structures – Classification and performance requirements. Brussels, Belgium.
- _____ (2013). **EN 301**. Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements. Brussels, Belgium.
- _____ (2013). **EN 16254**. Adhesives – Emulsion polymerized isocyanate (EPI) for load – bearing timber structures – Classification and performance requirements. Brussels, Belgium.
- FIGUEROA, M. J. M; MORAES, P. D. (2009). **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. Revista Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 9, n.4, p. 157-174, out/dez.
- FINK, G. (2014). **Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber**. PhD thesis, Institute of Structural Engineering, ETH Zürich, Switzerland, thesis No. 21746.
- FINK G., FRANGI A., KÖHLER J. (2013). **Modelling the bending strength of glued laminated timber – considering the natural growth characteristics of timber**. In Proceedings of 46th CIB-W18 Meeting, Paper CIB –W18/46-12-6, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- FONSECA E M M., BARREIRA L M S. (2009). **Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures**. In Third International Conference on Safety and Security Engineering. In: Safety and Security Engineering III. Southampton: Wit Press. p. 449-458. ISBN 978-1-84564-193-1. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10198/1569>>
- FRANGI, A; FONTANA, M. (2003). Charring rates and temperature profiles of wood sections. Fire and Materials. 27 (2): 91-102.
- FRANGI, A; FONTANA, M; MISCHLER, A.(2004). **Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures**. Wood Science and Technology, v. 38, p. 119-126. HARADA, T; GB/T 9978:2008
- GB/T 9978. (2008). **Fire – resistance tests elements of building construction – Part 1: General requirements (ISO 834-1: 1999, MOD)**.
- HANDBOOK of Fire Protection Engineering. (2008). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- HARADA T, MIYATAKE A, KAMIKAWA D, HIRAMATSU Y, INOUE A, HATANO Y. (2012). **Fire resistance of glued laminated timber bonded with RF, API ou PVAc resin**. In: Proceeding of World Conference of Timber Engineering. P. 70-77. Auckland New Zealand.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (2002). Nch 2148. cR 2010: Madera Laminada Encolada Estructural - Requisitos e Inspección. 53p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1999). **ISO 834-1**: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International organization for standardization, Geneva.

_____ (2002). **ISO 5660-1**. Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Geneva.

KÄLLANDER B., LIND P. (2001). **Strength properties of wood adhesives after exposure to fire**. Nordtes Project No. 1482-00 Building Technology. SP Report 2001:35. Swedish National Testing and Research Institute. Borås.

KLEECK, A.V; MARTIN, T.J. **Evaluation of flame-spread resistance of fiber insulation boards**. Report N° 1756. United States Department of Agriculture, Forest Service – Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin. 1956.

KLIPPEL, M. (2014). **Fire Safety of Bonded Structural timber elements**. PhD thesis, Institute of Structural Engineering, ETH Zürich, Switzerland, thesis No. 21843.

KLIPPEL, M; FRANGI A.; FONTANA, M. (2011). **Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire**. In: Fire Safety Science proceedings of the tenth international symposium, p. 1219-1232.

_____ (2012). **Fire behaviour finger-jointed timber boards**. In: 7th International Conference on Structures in fire, Zurich. Proceedings ... p. 347-356.

KÖNIG J., WALLEIJ L (1999). **One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and post protection situation**. Technical report, Swedish Institute for wood Technology.

KÖNIG J. (2005). **Structural fire design according to Eurocode 5 – design rules and their background**. Fire and Materials 29 (3): 147-163.

LANGE D, BOSTRÖM L, SCHMID J, ALBREKTSSON J. (2014). **Charring rate of timber in natural fires**. In: Proceedings of 8th International Conference on Structural in Fire. P. 521-528. ISBN: 978.7.5608.5494.6

LIE, T. T. (1977). **A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns**. Fire Research Section. Division of Building Research. National Research Council of Canada, Ottawa, Ont., Canada.

MANRIQUEZ, M. J (2008) **Influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do Paricá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MANRIQUEZ, M. J (2012). **Fatores de redução das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARTINS, G. C. A; MUNAIAR NETO, J. CALIL JUNIOR, C. (2015) **Determinação da seção transversal residual de elementos de madeira após a exposição ao fogo**. In: Congresso Ibero – Latino – Americano sobre Segurança contra Incêndio, 3. Proceedings. Porto Alegre – RS.

METTEM, C. J. (1988). **The versatility of glued -laminated timber**. The structural engineer. Londres, v. 66, n. 18, set.

MOLINA, J. C. (2013). **Estudo de ligações metálicas se sistemas mistos de madeira e concreto em situação de incêndio**. Pós-doutorado em Engenharia – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos. Pesquisa em andamento.

MORESCHI J C. (2013) **Biodegradação e preservação da madeira: preservativos da madeira**. Notas de aula. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR.

NJANKOUO, J. M, DOTREPPE, J- C; FRANSSSEN, J-M. (2004). **Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods**. Fire and Materials. 28: 15 – 24. DOI: 10.1002/fam.831.

ÖSTMAN, B; MIKKOLA, E. STEIN, R, FRANGI, A, KÖNIG, J; DHIMA, D; HAKKARAINEN, T.; BREGULLA J. (2010). **Fire safety in timber buildings**, Technical guideline for Europe. SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 19: 210

PINTO, E. M. (2001). **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos.

PINTO, E. M. (2005). **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a Grã para o Eucalyptus Citriodora e Eucalyptus Grandis**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos.

REVISTA DA MADEIRA (2007). **Madeira Preservada e seus conceitos**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira%20preservada%20e%20seus%20conceitos>. Acesso em: mai/2014.

Schaffer, E. (1967). Charring rate of selected woods – transverse to grain. Research Paper FPL 69, USDA Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, WI, USA>

SILVA, M. R (2012). **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto Citriodora e Pinus Taeda**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharias de Materiais) – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos.

TECHNICAL REPORT 10 (2003). **TR10**: Calculating the fire resistance of exposed wood members, American Wood Council, Washington, DC.

WANG Y, BURGESS I, WALD F, GILLIE M. (2013). Performance based fire engineering of structures: Timber Structures. ISBN: 978.0.203.86871. New York : CRC Press Taylor & francis Group. P. 170-173.

WHITE, R. H. (1988). Charring rates of different wood species. PhD thesis, University of Wisconsin, Madison.

_____. (2002). **Analytical methods for determining fire resistance of timber members**. 3th. Westford: society of fire protection, cap. 11.

YANG, T.H; WANG, S.H; TSAI, M.J, LIN, C.Y. (2009a) **Temperature distribution within glued laminated timber during a standard fire exposure test**. Materials and Design, v. 30, p. 518-525.

_____. (2009b). **The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test**. Building and Environment, v. 44, p. 231-236.

ZHAOPENG, N.I; PEIFANG, Q.I.U. (2012). Experimental study on fire resistance performance of glulam beams. Applied Mechanics and Materials. V. 193-194, p. 539-543.

APÊNDICE A – Ensaio Preliminar

Tendo como finalidade calibrar o forno horizontal e avaliar o método adotado para execução dos ensaios foi realizado um ensaio termoestrutural preliminar, sendo este o primeiro ensaio realizado no forno horizontal da EESC / USP. Foi posicionada uma viga de MLC no interior do forno com as seguintes dimensões: comprimento de 6000 mm, vão entre apoios de 5100 mm, e seção transversal de 120 mm por 440 mm. Fabricada com madeira da espécie *Eucalyptus Grandis* e adesivo do tipo fenol resorcinol. Para a análise foram realizados ensaios de flexão em três pontos à temperatura ambiente e em temperatura elevada, considerando a curva de aquecimento padronizada estabelecida pela norma ISO 834:1999.

O ensaio de flexão à temperatura ambiente foi realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM- EESC – USP), com uma viga semelhante a ensaiada em temperatura elevada. Aplicou-se uma força vertical concentrada no centro da viga, aumentando-a gradualmente até ocorrer à ruptura, conforme Figura A.1). A carga última, o módulo de elasticidade e resistência à flexão resultaram iguais a 80,5 kN, 10945 MPa e 20,77 MPa, respectivamente.

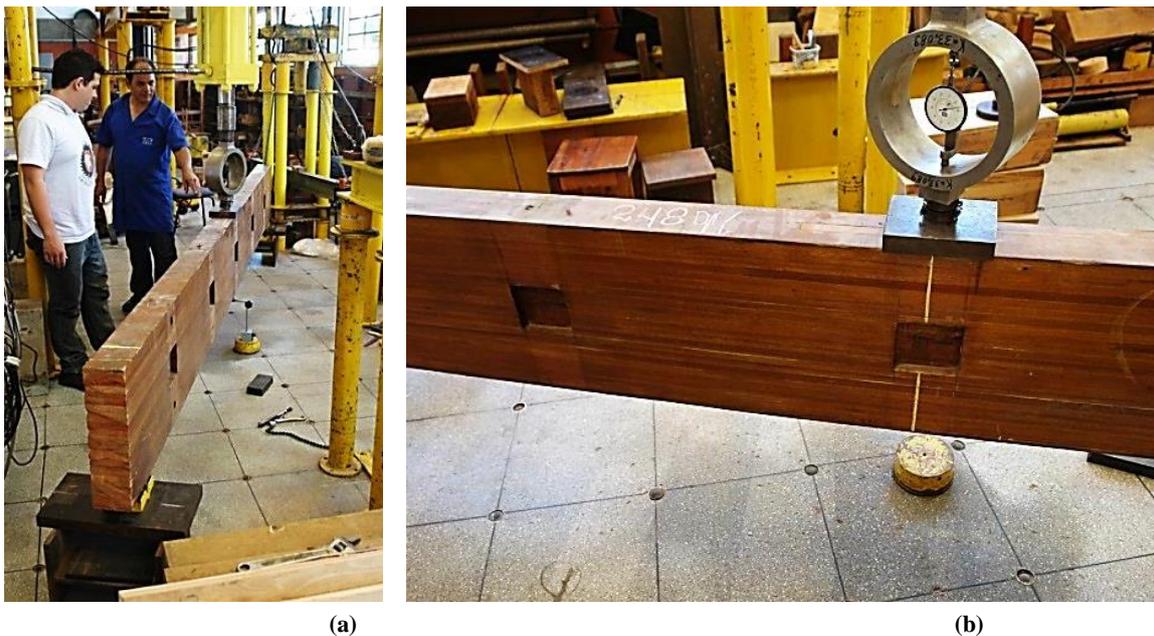


Figura A.1: Ensaio de flexão na viga de MLC à temperatura ambiente (a) visão geral do ensaio; (b) detalhe do carregamento aplicado.

Para a realização dos ensaios no forno horizontal a viga foi instrumentada com termopares do tipo K, para registro da temperatura no interior da seção do elemento. Na proposta do ensaio preliminar, os termopares foram posicionados na seção transversal no meio do vão, por meio de furos realizados na face lateral em diferentes profundidades após a fabricação da viga, como pode ser observado na Figura A.2.

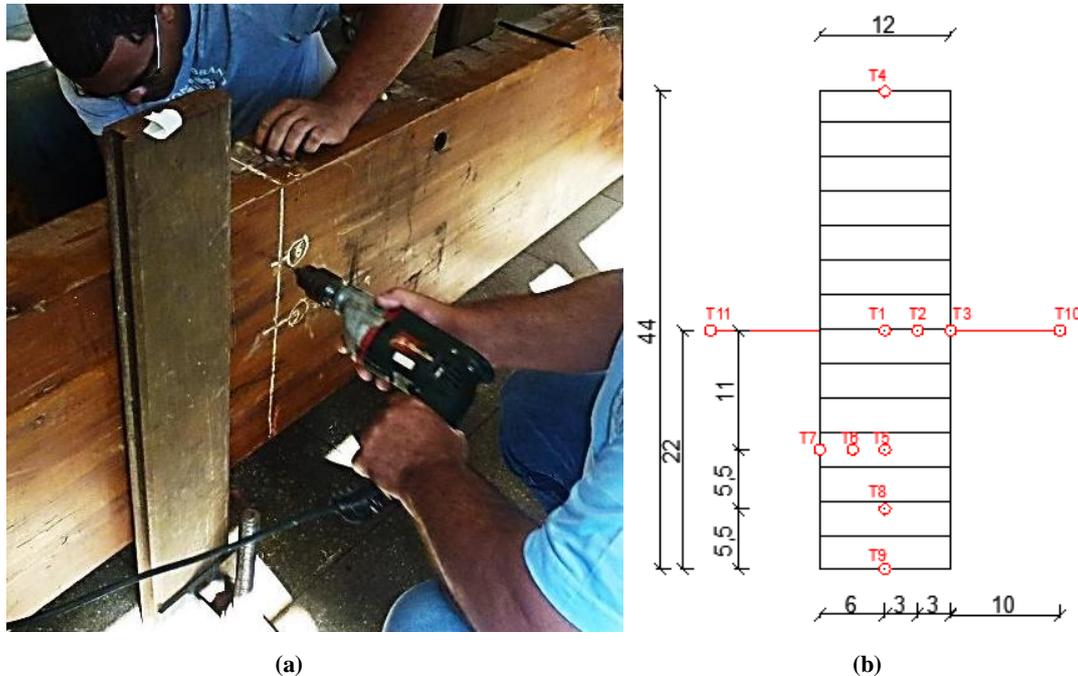


Figura A.2: Posicionamento dos termopares: (a) realização de furos pela face lateral; (b) layout de distribuição dos termopares com dimensões em centímetros.

A viga foi exposta ao fogo em três faces (laterais e face inferior), enquanto a face superior da viga foi revestida com manta cerâmica, conforme mostrado na Figura A.3.a. O elemento foi simplesmente apoiado e restringido a torção nas extremidades, conforme Figura A.3.b, permitindo a ocorrência de deformações axiais na viga. Todas as frestas do forno foram cobertas por painéis de manta cerâmica confeccionada especialmente para a seção analisada.

Aplicou - se uma força concentrada e constante no meio do vão livre. O ensaio foi interrompido após 18 minutos de exposição ao fogo e a temperatura média máxima registrada no interior do forno foi igual a 806°C. O teste foi interrompido devido à leituras de temperatura acima das esperadas em um dos pontos de medição no interior da seção transversal.

A Figura A.4 apresenta as curvas de aquecimento em diferentes profundidades da seção transversal, bem como temperatura média pelos termopares instalados no interior do forno.



(a)

(b)

Figura A.3: (a) Isolamento da face superior; (b) Sistema de apoio e restrição à torção da viga.

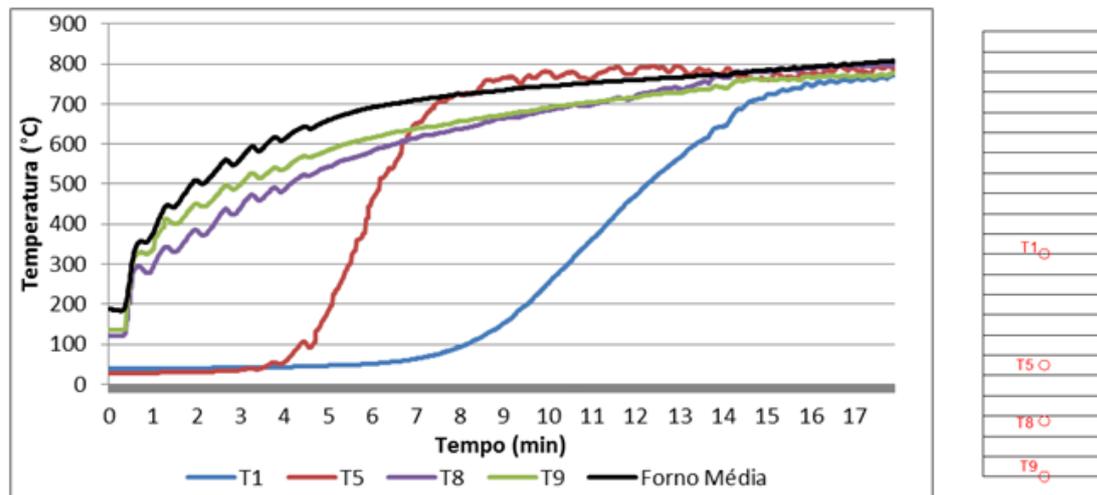


Figura A.4: Curvas de aquecimentos em diferentes profundidades na seção transversal.

Decorridos 10 minutos de ensaio as temperaturas registradas pelo termopar T1 aumentaram rapidamente, como pode ser observado na Figura A.4. Entretanto, o termopar T1 estava localizado no centro da seção transversal e tal registro de temperatura não era esperado, levando em consideração dados encontradas durante a revisão bibliográfica por diversos autores como em Källander e Lind (2001), Yang et al. (2009), Klippel et al. (2011) e Harada et al. (2012). Devido a inexperiência dos pesquisadores, sendo o primeiro ensaio realizado no equipamento decidiu-se por desligar os queimadores e encerrar os ensaios, com receio do colapso do elemento supondo que a seção transversal estava com processo de carbonização avançado.

Depois de desligar o queimador e aliviar o carregamento, o elemento permaneceu no interior do forno, pois não era possível fazer a remoção devido a

temperatura elevada que permanecia no forno. Sem a utilização do quadro de apoio, como os ensaios realizados posteriormente, o forno foi fechado com a tampa e a remoção do elemento foi realizada conforme Figura A.5.

Sendo assim, o processo de carbonização não era encerrado ao desligar os queimadores, portanto não foi possível, neste caso, estimar a taxa de carbonização real da espécie de madeira.



Figura A.5: Retirada da viga após o ensaio.

A avaliação da seção transversal residual foi realizada e como pode ser observado na Figura A.6, o ponto de localização do termopar T1 permaneceu intacta, portanto confirmando o erro de leitura.



Figura A.6: Seção transversal após o ensaio.

Os erros e limitações observados durante o ensaio preliminar foram discutidos com pesquisadores experientes durante o período de estágio no exterior. A justificativa para os erros de leitura foi o fato de que os furos para instalação dos termopares foram realizados a partir da face lateral, sendo expostos diretamente ao fogo.

Os termopares do tipo K utilizados para a preparação do ensaio preliminar eram revestidos com fibra cerâmica com capacidade para resistir até temperaturas 600°C, de acordo com informações disponibilizadas pelo fabricante. Observou-se que o aumento da temperatura registrada para o termopar T5 ocorreu quando a temperatura média do

forno foi superior a 600°C, indicando perda da capacidade isolante do termopar, conforme pode ser observado na Figura A.7.

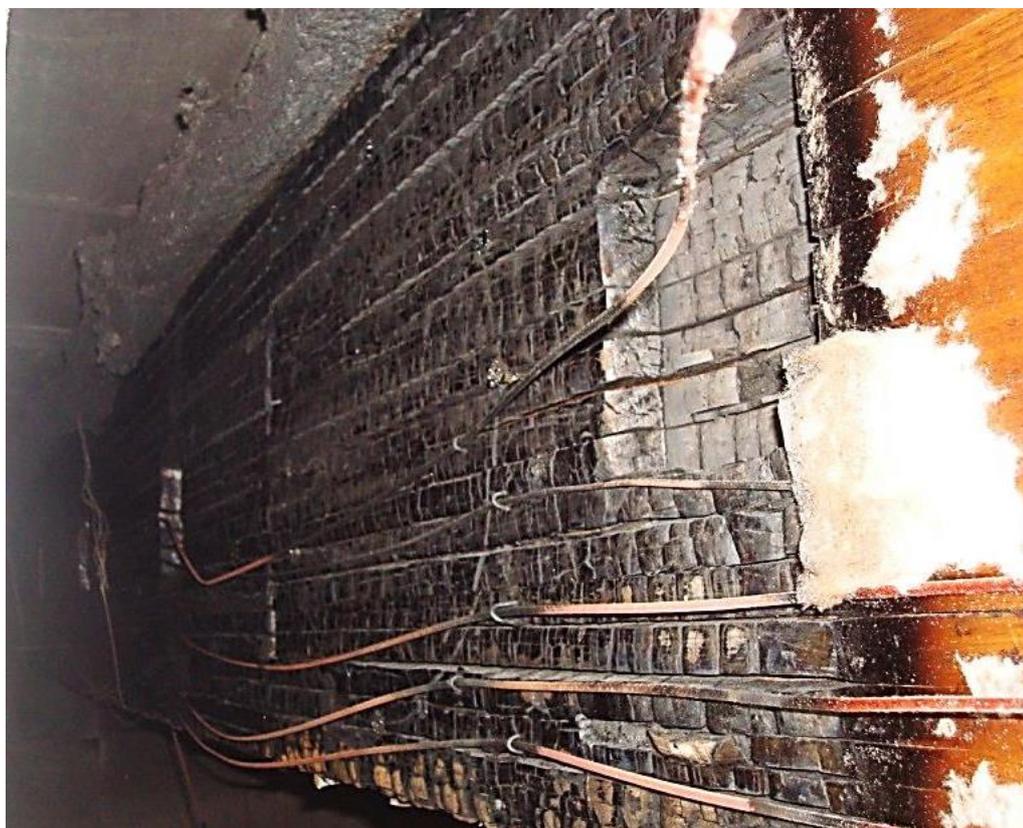


Figura A.7: Viga no interior do forno depois de encerrado o ensaio e resfriamento do forno.

Outro ponto crítico do ensaio piloto discutido com os pesquisadores do ETH foi à avaliação da taxa de carbonização durante o ensaio termoestrutural. A solução sugerida para o problema foi à construção do quadro de apoio, e inicialmente realizar apenas testes apenas para a avaliação da taxa de carbonização, para depois se realizar uma análise termoestrutural. Sendo esta a metodologia no desenvolvimento do programa experimental do presente trabalho.

APÊNDICE B – Procedimentos para dimensionamento da ligação

A fim de aumentar o comprimento dos elementos de Madeira Laminada Colada para a realização de ensaios em temperaturas elevadas no interior do forno foi necessário preparar uma emenda, para tanto se adotou uma conexão resistente a momento, como ilustrado na Figura B.1.

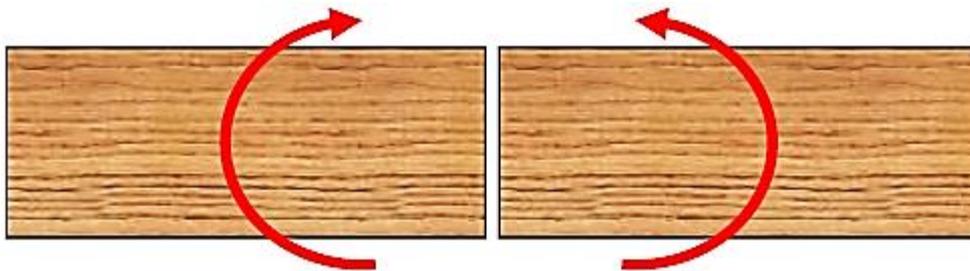


Figura B.1: Representação do tipo de conexão a momento

Para preparar a viga com o comprimento final de 6000 mm foram utilizados dois elementos com comprimento de 3500 mm. Um dos elementos foi dividido ao meio resultando em duas partes que foram conectadas as extremidades do outro elemento, como ilustrado na Figura B.2. Considerou-se a força (F) sendo 40% da força máxima aplicada no ensaio a três pontos realizado em temperatura ambiente e discutido no capítulo 3. O vão livre foi igual a 5100 mm e a seção transversal de 150 por 420 mm.

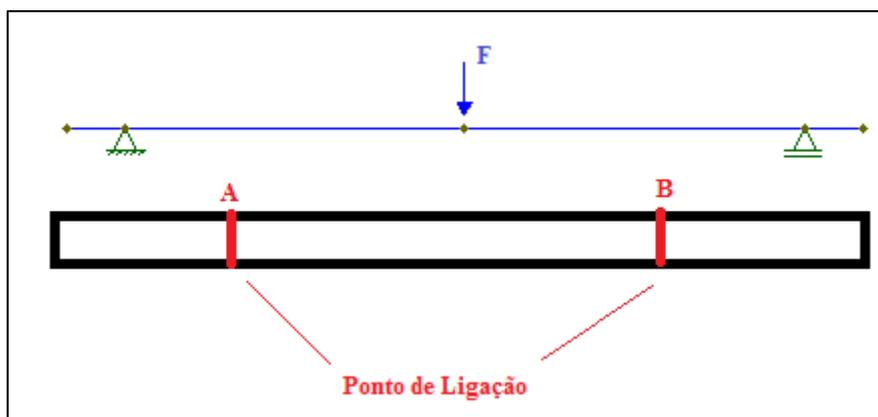


Figura B.2: Representação do tipo de conexão a momento

O princípio básico da ligação resistente a momento como ilustrado na Figura B.3. A distância entre os pinos metálicos e a borda da viga foi considerando sendo duas vezes o diâmetro dos pinos.

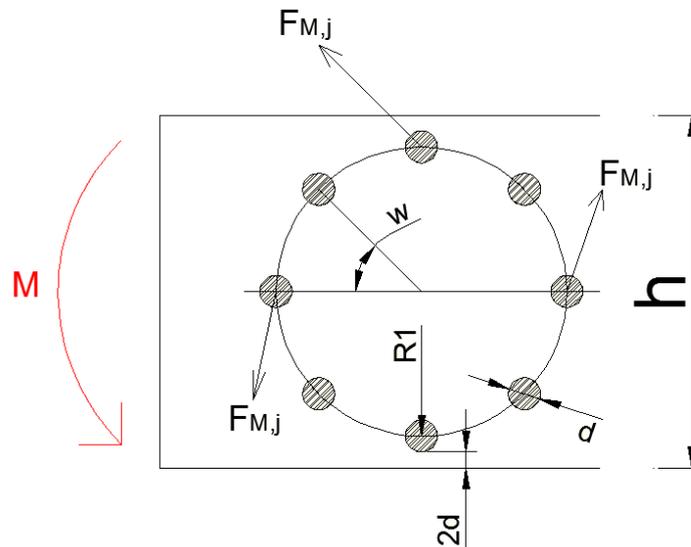


Figura B.3: Layout da ligação resistente a momento.

O cálculo do momento resistente (M) para a ligação foi calculado por meio da Equação A.1.

$$M = \sum_{j=1}^n F_{M,j} \cdot r_j \quad \text{Equação A.1}$$

Sendo,

$F_{M,j}$ a resistência aplicado nos pinos metálicos

j refere-se à quantidade de pinos;

r_j é a distancia a partir do centro de rotação

A fórmula de Hankinson (Equação A.2) foi adotada para determinar a relação entre a força e a orientação das fibras.

$$F_{\alpha} = \frac{F_0 \cdot F_{90}}{F_0 \cdot \sin^2 \alpha + F_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad \text{Equação A.2}$$

Os dados necessários para o dimensionamento foram obtidos por meio de ensaios em temperatura ambiente, os quais estão apresentados no capítulo de análise experimental. Na Tabela B.1 apresentam-se os dados utilizados nos cálculos.

Tabela B.1: Dados necessários para realizar o dimensionamento da ligação.

Madeira	Força (kgf)	F _{40%} (kgf)	Momento solicitado em A e B (kgf*cm)	Resistência à compressão (kgf/cm ²)			
				f _{co,m}	f _{eo,d}	f _{e90,d}	f _{c45,d}
Lyptus	36275	14510	580400	600	510	127,5	204
Pinus	29732	11892,8	475712	320	272	68	108

Na falta de determinação experimental específica para a resistência de embutimento da madeira, admitiu-se a relação proposta pela ABNT NBR 7190: 1997, expressa pela Equação A.3 e Equação A.4

$$f_{\alpha} = f_{c0,d} \tag{Equação A.3}$$

$$f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \tag{Equação A.4}$$

O tamanho da emenda para conexão das partes foi adotado como sendo igual à altura da viga, ou seja, 420 mm. Para o dimensionamento foram considerados oito pinos metálicos com diâmetro de 19 mm e comprimento de 130 mm. Detalhes e dimensões da ligação podem ser visualizados na Figura B.4 e Figura B.5.

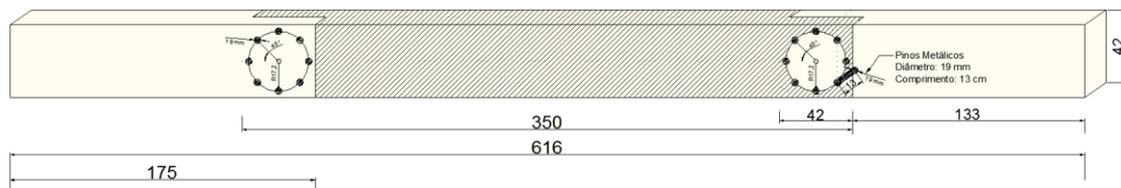


Figura B.4: Visão geral do layout para preparação da emenda e ligações. Dimensões em centímetros.

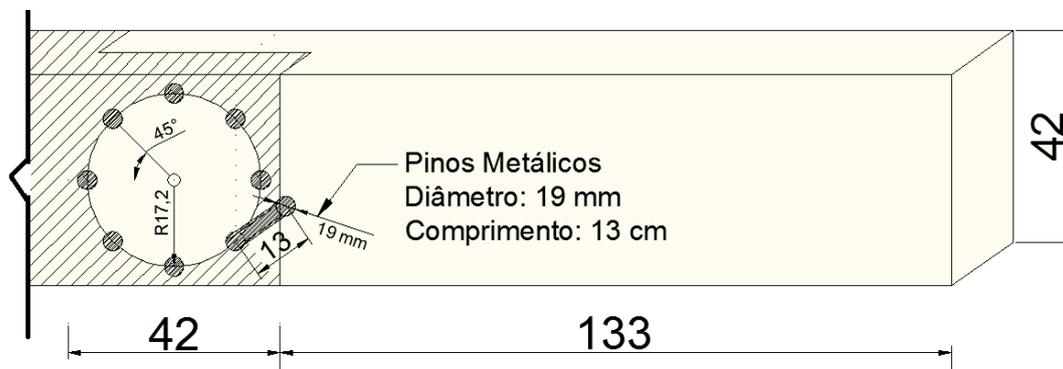


Figura B.5: Detalhe do layout para preparação da emenda e ligações. Dimensões em centímetros.

A força determinada pelo parafuso e o momento resistente calculado são apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2: Dados determinados para o dimensionamento da ligação

Madeira	Momento Solicitado em A e B (kgf*cm)	Resistência à compressão (kgf/cm ²)			Momento Resistente em A e B (kgf*cm)
		F (0°)	F (45 °C)	F (90 °C)	
Lyptus	580400	12597	5038	3149	888340
Pinus	475712	6718	2687	1679	473781

O pino metálico foi preparado com comprimento de 13 cm, sendo que para completar a largura da viga foram posicionadas cavilhas de madeiras em ambos os lados, como pode ser visto na Figura B.6.



Figura B.6: Ligação: (a) sem preenchimento; (b) com preenchimento com cavilha de madeira.

As imagens abaixo ilustram a preparação e o resultado final da conexão circular para resistência a momento.



Figura B.7: Pinos metálicos confeccionados para a ligação.

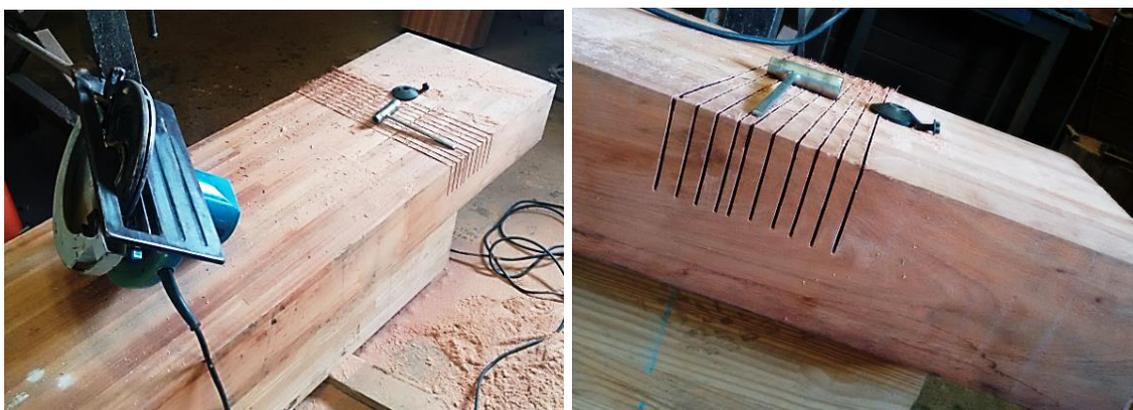


Figura B.8: Preparação do corte para emenda



Figura B.9: Detalhe do corte e molde para a realização da ligação.



Figura B.10: Detalhe da ligação finalizada.

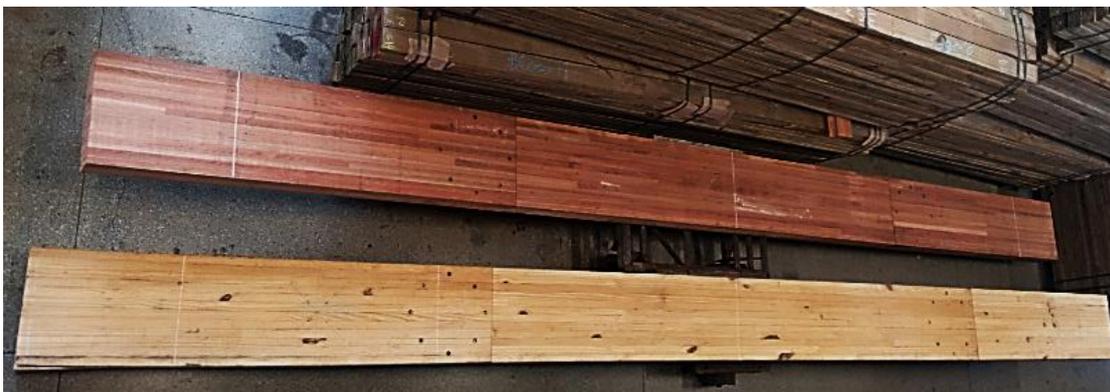


Figura B.11: Vista superior dos elementos finalizados com a conexão.

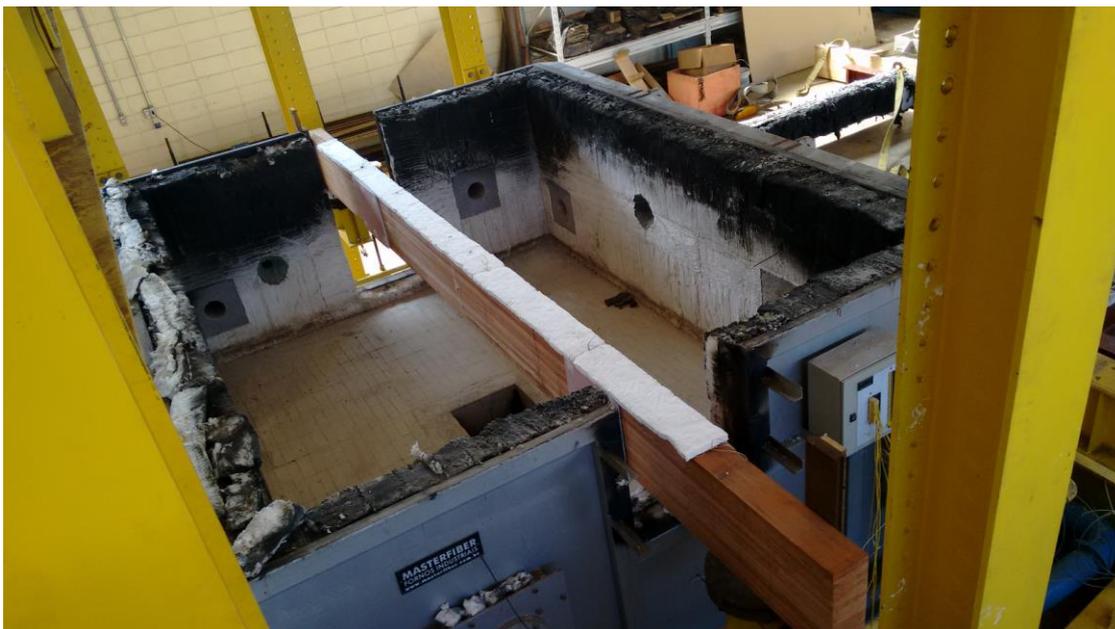


Figura B.12: Vista superior dos elementos finalizados com a conexão.

APÊNDICE C – Registro Fotográfico



Figura C.1: Revestimento térmico realizado nos ensaios para avaliação de carbonização



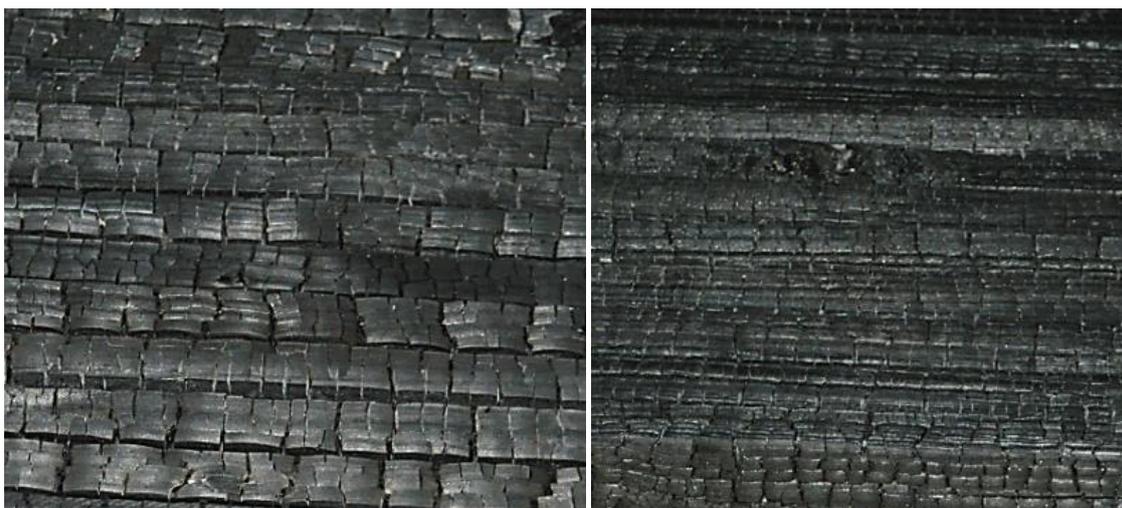
Figura C.2: Resfriamento dos elementos após o ensaio.



(a)

(b)

Figura C.3: Padrão de carbonização depois de 30 minutos de exposição: (a) Lyptus; (b) Pinus



(a)

(b)

Figura C.4: Padrão de carbonização do Pinus depois de 30 minutos de exposição: (a) FR 100; (b) CCB



Figura C.5: Elementos estruturais de MLC depois de expostos ao fogo por 30 minutos



Figura C.6: Vigas de Lyptus no interior do forno depois de encerrado o ensaio termestrutural.



Figura C.7: Vigas de Lyptus no interior do forno depois de removida a tampa.