

REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE O COMPORTAMENTO AO FOGO DE PAREDES DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

Ângela Gaio Graeff¹

<https://orcid.org/0000-0001-6453-8270>

Felipe Risbacik²

<https://orcid.org/0009-0004-8646-1680>

RESUMO

A busca por soluções construtivas mais ambientalmente sustentável tem aumentado nos últimos anos, principalmente acerca do uso da madeira. Devido a isso, os painéis de madeira laminada colada cruzada (MLCC) estão sendo amplamente utilizados como paredes com função estrutural. A pouca difusão do conhecimento, o vácuo de assuntos inexplorados sobre o MLCC e a percepção negativa que a sociedade brasileira tem em relação à sua durabilidade e quantidade, impede o crescimento do uso de MLCC no Brasil. Dessa forma, é categórico a necessidade de mais estudos voltados ao desempenho de painéis de MLCC em relação a altas temperaturas e de difundir essa informação com o objetivo de mostrar que a MLCC é tecnicamente viável. Nesse sentido, este artigo propõe-se a realizar um referencial teórico sobre a problemática do comportamento de paredes de MLCC em situação de incêndio. Destaca-se que o método da seção transversal reduzida não é aplicável para paredes de MLCC, que aquelas com cinco camadas demonstraram melhor desempenho em situações de incêndio do que as com três camadas e que adesivos demelamina-ureia-formaldeído(MUF) são considerados mais rígidos e reticulados, apresentando melhor desempenho em temperaturas elevadas do que formulações de poliuretano mono componente (PU).

Palavras chaves: Paredes de MLCC; MLCC; Madeira lamelada colocada cruzada; Segurança contra incêndio; Resistência ao fogo.

¹Engenharia Civil (2004). Mestra em Estruturas (2007) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Doutora em Estruturas (2011) pela Universidade de Sheffield (Inglaterra) e Pós-doutorado pela UFRGS. Professora adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança contra Incêndio da UFRGS.

² Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

THEORETICAL FRAMEWORK ON THE FIRE BEHAVIOR OF CROSS-LAMINATED TIMBER WALLS

ABSTRACT

To search for more environmentally friendly constructive solutions has increased in recent years, especially regarding the use of wood. As a result, cross-laminated timber panels (CLT) has been widely employed as walls with a structural function. The limited dissemination of knowledge, unexplored aspects of CLT, and the negative perception in the Brazilian society regarding durability and quality, hinder the growth of CLT usage in Brazil. Thus, there is a need for more studies focused on the performance of CLT panels regarding high temperatures and to disseminate this information with the aim of demonstrating that CLT is technically viable. In this regard, this article aims to provide a theoretical framework on the issue of CLT wall behavior in fire. It is worth noting that the reduced cross-sectional method is not apply to CLT walls, that panels with five layers demonstrate better performance in fire situations than those with only three layers, and that melamine-urea-formaldehyde (MUF) adhesives are considered stiffer and cross-linked, exhibiting better performance at high temperatures than single-component polyurethane (PU) formulations.

Keywords: CLT walls; CLT; Cross laminated timber; Fire safety; Fire resistance.

Artigo Recebido em 18/03/2024

Aceito em 01/06/2024

Publicado em 04/07/2024

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material sustentável que possui um grande potencial para minimizar o impacto no meio ambiente e ainda competir com diversos produtos, principalmente com os sintéticos (Amiri *et al.*, 2020 -Jiang *et al.*, 2018). Com a crescente preocupação com a deterioração do meio ambiente, mais atenção tem sido direcionada à madeira como fonte renovável na construção civil, visto que esse material reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de forma indireta pela possibilidade de captura CO₂ e pelo fato de liberarem menos emissões em comparação aos materiais convencionais utilizados nessa área (Jiang *et al.*, 2018 -Rovaris, 2019 –Himes; Busby, 2021). Segundo Chen *et al.* (2018), quando o manejo florestal é realizado de forma sustentável, a madeira plantada pode contribuir significativamente para mitigação da emissão dos GEE, especialmente quando utilizadas para a produção de painéis estruturais e madeira serrada.

Nesse sentido, o *Mass Timber* ou madeira engenheirada (ME) em português, surge como um novo sistema construtivo que é inovador, pré-fabricado e sustentável (Liang; Gu; Bergman, 2021). A ME se refere a uma categoria de sistema construtivo que utiliza produtos compostos de madeira maciça e que são submetidos a tratamentos e processos de engenharia que agregam qualidade e homogeneidade (Nakamura, 2021). Dentre elas, destacam-se a madeira lamelada colada cruzada (MLCC ou *CLT* em inglês) e a madeira lamelada colada (MLC ou *Glulam* em inglês), que se tornaram concorrentes do aço e do concreto armado no mercado da construção de edifícios de médio a grande porte (Kuzmanovska *et al.*, 2018).

A MLC consiste na colagem de lamelas de madeira com adesivo estrutural de forma paralela às suas fibras, formando uma única peça de grande resistência e estabilidade (Stark *et al.*, 2010). Ela é principalmente utilizada para produção de pilares, vigas e outros elementos estruturais, possuindo como vantagens significativas a sua adaptabilidade a diferentes formas arquitetônicas e a sua resistência a solicitações mecânicas

(Segundinho *et al.*, 2014 - Cunha *et al.*, 2010 –Dziurka *et al.*, 2022 - Lam *et al.*, 2018).

Por outro lado, a MLCC é um painel composto por um arranjo ortogonal de camadas (geralmente 3, 5 ou 7 dependendo do uso e do carregamento), em que cada uma é feita de lamelas coladas uma ao lado da outra, unidas com um adesivo estrutural (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). Essa estrutura de multicamadas altamente otimizada fornece uma grande capacidade de sustentação, permitindo que esses painéis sejam usados como lajes ou como paredes com função estrutural (Santis *et al.*, 2022 – Huber *et al.*, 2021).

O sistema de construção com MLCC é desenvolvido e aceito no mercado da América do Norte e Europeu, com construções de prédios com multipavimentos (Almeida *et al.*, 2022), como por exemplo o projeto *Dalston Works* de dez andares da empresa *Waugh Thistleton Architects*, em Londres, concluído em 2017, montado inteiramente de painéis de MLCC. Ademais, políticas para aumentar o uso da madeira como material de construção permanente pelo setor da construção têm sido adotadas por países como Suécia, França, Reino Unido, Japão, África do Sul, Argentina, Canadá e Estados Unidos (Rovaris, 2019).

No Brasil, o uso de MLCC ainda não está completamente difundido, embora esteja consolidado através de grandes empresas que atuam no Brasil. Apesar dos avanços das publicações científicas no país sobre o tema, o crescimento do mercado e a atualização da Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), o setor se encontra numa fase preliminar de expansão (Almeida *et al.*, 2022). A pouca difusão do conhecimento, o vácuo de assuntos não explorados sobre o MLCC e, principalmente, a percepção negativa que a sociedade brasileira tem em relação à durabilidade e qualidade, sobretudo por ser um material inflamável, impede o crescimento do uso de MLCC no Brasil (Shigue, 2018).

Essa insegurança diante de potenciais riscos relacionados a incêndios que a população tem, é fruto do desconhecimento do comportamento da

madeira em relação ao fogo. Quando submetida às chamas, a madeira tem carbonização superficial e essa camada de carvão age como uma espécie de isolante, impedindo a penetração de calor para o interior da seção e dificultando a saída de gases. Isso resulta em uma velocidade menor de degradação da estrutura, possibilitando que o elemento tenha capacidade de manter a sustentação estrutural por um determinado tempo após ter sido exposto a altas temperaturas (Figueroa; Moraes, 2009 – Silva *et al.*, 2020).

Atualmente, o maior problema enfrentado pelos engenheiros ao projetar edifícios de elevada altura em madeira é garantir que a evacuação dos ocupantes ocorra de forma segura. Isto significa que, em caso de incêndio, as paredes e as lajes de MLCC devem manter uma capacidade de carga suficiente para a manutenção do equilíbrio da estrutura, a fim de evitar o colapso e de manter condições de isolamento e estanqueidade para possibilitar a evacuação e o combate ao incêndio. Por isso, torna-se extremamente necessário investigar o comportamento desses tipos de estruturas em exposição a altas temperaturas (Cowlard *et al.*, 2013 – Hayajneh, 2022).

Nesse sentido, este artigo propõe-se a produzir um referencial teórico sobre a problemática do comportamento de paredes de MLCC em situação de incêndio. Essa compreensão do estado do conhecimento é necessária no processo de evolução da ciência, especialmente para estruturas que utilizam a madeira como elemento estrutural, onde ainda há a necessidade de estudos e de compilações sobre os mesmos, afim de que se ordene periodicamente o conjunto dessas informações e resultados já obtidos. Espera-se, assim, compilar informações e tentar identificar lacunas existentes no campo do conhecimento, com o objetivo de nortear os pesquisadores e profissionais da área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

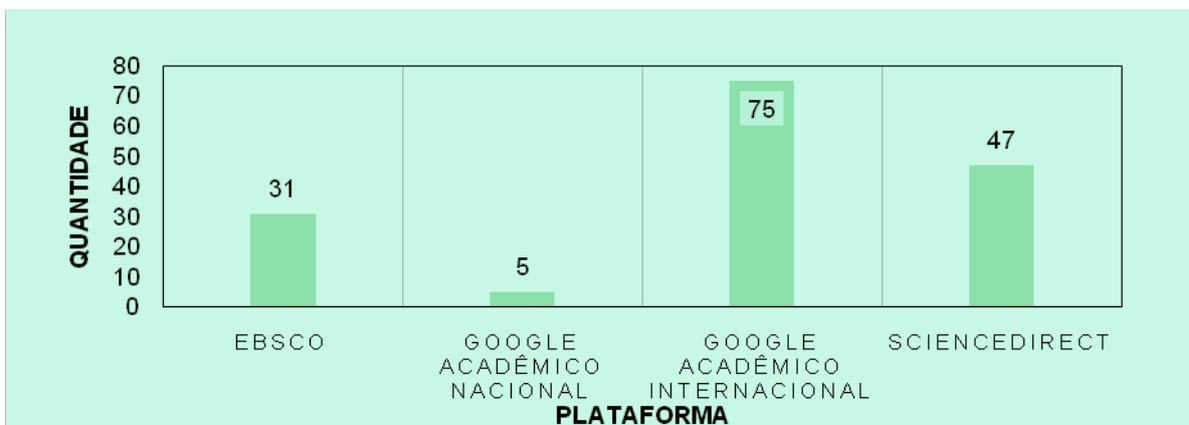
Foi definido como método de pesquisa a realização de um referencial teórico sobre paredes de MLCC em situação de incêndio, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática. As fontes utilizadas para a elaboração desse estudo foram artigos disponíveis em bancos de dados que a Universidade Federal do Rio Grande do Sul possui convênios e normas técnicas nacionais e internacionais.

Foram utilizadas as seguintes plataformas para a busca sistemática: EBSCO host; Google acadêmico nacional; Google acadêmico internacional; Science Direct. Para realizar as pesquisas nos bancos de dados, foi necessário definir o tema, a pergunta chave e os descritores, conforme mostrado na sequência:

- Tema: Comportamento da Madeira lamelada colada cruzada exposta a temperaturas elevadas;
- Pergunta: O que os pesquisadores estão publicando sobre resistência ao fogo da madeira colada cruzada?;
- Descritores: madeira laminada cruzada fogo / *Cross laminated timber fire* / madeira laminada cruzada segurança contra incêndio.

Após a busca nas plataformas mencionadas, foram selecionados 87 artigos para serem avaliados. O gráfico¹ apresenta a quantidade de artigos encontrados por plataforma.

Gráfico 1 - Artigos encontrados por plataforma

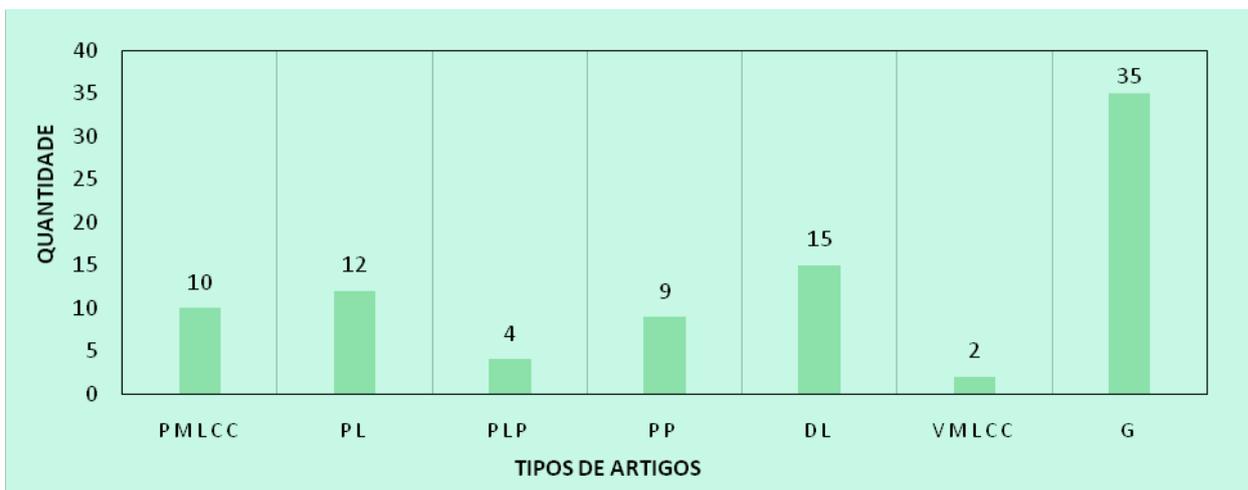


Fonte: Autores

Após a leitura do resumo e da introdução a fim de identificar o enfoque do artigo, os 87 artigos foram classificados em 7 tipos e apresentadas as quantidades no gráfico2, conforme as legendas especificadas abaixo:

- Propriedades físicas dos painéis de MLCC em situação de incêndio (PMLCC);
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de laje (PL);
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de laje ou parede (PLP);
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de parede (PP);
- Análises sobre delaminação dos painéis de MLCC (DL);
- Análises de vigas de MLCC (VMLCC);
- Gerais: análises da MLCC exposta na dinâmica de incêndio em compartimento; modelos para projetos de resistência ao fogo da MLCC; avaliação do desempenho de integridade ao fogo de juntas entre painéis de MLCC; entre outros e que não se classificaram em nenhum dos anteriores (G).

Gráfico 2 - Quantidade de artigos por classificação



Fonte: Autores

Em seguida, foram selecionados nove artigos tipificados como análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de parede. Os assuntos específicos abordados por eles são necessários para a compressão do comportamento de paredes de MLCC expostas ao fogo. Dentre os principais temas apresentados, encontra-se a realização de experimentos com o objetivo de validar parâmetros especificados em norma, como a taxa de carbonização e a camada de resistência zero - assuntos que serão abordados nos itens seguintes. Também, verifica-se que há preocupação com a criação de modelos computacionais para simulação do comportamento mecânico de paredes de MLCC em situação de incêndio. No quadro1, encontra-se o nome destes artigos, o ano em que ocorreu cada publicação e qual a sua principal conclusão.

Quadro1 - Artigos selecionados para o referencial teórico

Nome	Ano	Principal conclusão
<i>Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions - Schmid, J.; Menis, A.; Fragiacom, M.; Clemente, I.; Bochicchio, G.</i>	2015	Método da seção transversal reduzida é inadequado para prever a duração da resistência ao fogo de paredes de MLCC em ensaios de curva de fogo padrão
<i>Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber panels - Henek, V.; Venkrbec, V.; Novotný, M.</i>	2017	A integridade das paredes de MLCC foi preservada durante todo o período do ensaio de fogo, ou seja, 60 minutos

<i>Structural response of cross-laminated timber compression elements exposed to fire - Wiesner, F.; Randmael F.; Wing Wan F.; Bisby, L.; Hadden, R. M.</i>	2017	Conceito da camada de resistência zero atual é uma aproximação simplista, não sendo suficiente para considerar a física de materiais complexos, como MLCC exposto ao fogo
<i>Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall - Thi, V.D.; Khelifa, M.; Oudjene, M.; ElGanaoui, M.; Rogaume, Y.</i>	2018	O modelo numérico desenvolvido precisa de melhorias mais profundas antes que possa ser considerado uma ferramenta robusta e geral para o projeto de incêndio de paredes de MLCC
<i>The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis - Wiesner, F.; Bisby, L.</i>	2019	A meta-análise demonstrou que a precisão da previsão de resistência ao fogo observada nos métodos de projeto para paredes de MLCC é relativamente baixa
<i>Fire tests of South African cross-laminated timber wall panels: fire ratings, charring rates, and delamination - Westhuyzen, S.; Walls, R.; Koker, N.</i>	2020	A taxa média de carbonização calculada para parede de MLCC pinus SA e eucalipto foi de 0,95 mm/min e 0,76 mm/min, respectivamente. Esses valores são superiores à taxa de carbonização recomendada, que variam entre 0,61 mm/min e 0,68 mm/min
<i>Residual compressive load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after exposed to one-side fire - Bai, Y.; Zhang, J.; Shen, H.</i>	2021	Nos ensaios de capacidade de carga de compressão residual, o modo de falha das paredes de MLCC mudou da compressão axial típica antes do fogo para a compressão excêntrica à temperatura normal após o fogo
<i>Experimental and numerical analysis of residual load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after fire - Bai, Y.; Zhang, J.; Shen, H.</i>	2021	Ensaio de compressão axial em temperatura ambiente e ensaios padrão de incêndio são simulados pela modelagem mecânica e térmica, respectivamente. As distribuições de tensão e os processos de falha das paredes de MLCC de 3 e 5 camadas submetidas a carregamentos axiais de compressão são descritos de forma razoável
<i>Structural fire engineering considerations for cross-laminated timber walls - Wiesner, F.; Hadden, R.; Deeny, S.; Bisby, L.</i>	2022	As paredes de MLCC falharam devido à instabilidade global, com deflexões laterais descontroladas indicando escoamento compressivo como a principal causa de falha

Fonte: Autores

Através da Figura 1, é possível observar que atualmente as pesquisas sobre paredes de MLCC expostas ao fogo concentram-se na região da Europa. Seus estudos focam principalmente em ensaios experimentais e modelos numéricos para resistência ao fogo de MLCC. Por outro lado, a China vem demonstrando interesse nesse assunto, sendo o único país que publicou artigos em 2021. Nestes, o objetivo principal era criar métodos numéricos e modelos de simulação para prever a capacidade de carga residual das paredes de MLCC.

Figura 1 - Mapa da localização dos artigos utilizados neste referencial teórico



Fonte: Autores

Os itens a seguir fornecem uma visão geral do conhecimento atual sobre o desempenho estrutural de paredes de MLCC em situação de incêndio, qual a influência de adesivos e espessura da camada no comportamento das paredes de MLCC e qual é o efeito da decomposição do fogo e da fase de resfriamento na capacidade de carga das paredes de MLCC.

3 RESISTÊNCIA AO FOGO DAS PAREDES DE MLCC

A resistência ao fogo de madeira lamelada colada (MLC), avaliada por ensaios de temperatura padrão em fornos, tem sido estudada desde o início do século XX. Já em 1967, Malhotra e Rogowski propuseram um modelo empírico para prever a resistência ao fogo de colunas de madeira lamelada colada. Esse método de cálculo foi baseado em ensaios de fogo padrão em escala real. Com isso, o modelo construído poderia ser usado para prever a resistência ao fogo, com base na atribuição de parâmetros de entrada, derivados experimentalmente para cada uma das variáveis investigadas.

Por conseguinte, esses parâmetros foram extrapolados para além dos resultados experimentais de forma a possibilitar a previsão da resistência ao fogo para outras condições. No entanto, o espaço de aplicação deste modelo é extremamente restrito e não pode ser aplicado em elementos de paredes de MLCC, visto que, atualmente, existem novos tipos de adesivos e novas espécies de madeiras com propriedades mecânicas variadas e com lamelas na posição vertical (Wiesner *et al.*, 2017).

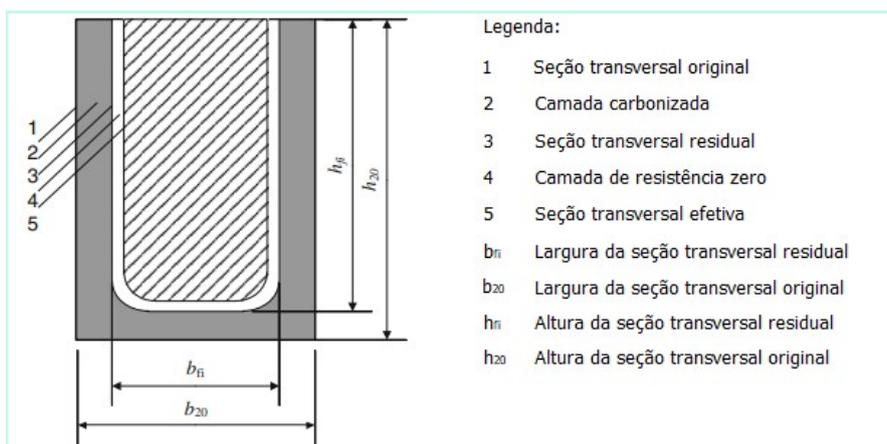
3.1 Método da Seção Transversal Reduzida

Atualmente, o método de verificação e análise de projeto de resistência ao fogo mais comum usado para elementos estruturais de madeira, inclusive especificado na NBR 7190(ABNT, 2022) e EN 1995-1-2 (CEN, 2004), é o método da seção transversal reduzida (STR) proposto por Schaffer em 1984. O método tem como princípio a formação de uma camada de carvão (camada de sacrifício) na superfície de elementos estruturais de madeira expostos ao fogo. A faixa carbonizada proporciona um isolamento do resto da seção, protegendo parcialmente a madeira subjacente do fogo, causando uma redução do aumento das temperaturas internas e a deterioração da capacidade de carga dos elementos estruturais (Wiesner *et al.*, 2017).

No método STR, presume-se que a madeira carboniza a uma taxa nominal (taxa de carbonização) que varia dependendo das condições específicas definidas em norma. Assume-se que a camada de sacrifício não tem capacidade mecânica. Além disso, uma faixa da seção da madeira abaixo do carvão é afetada, reduzindo suas propriedades devido aos efeitos de aquecimento e transporte de umidade. No método STR clássico, as consequências mecânicas da madeira termicamente afetada sob o carvão são tratadas agrupando uma porção da zona afetada em uma faixa denominada “camada de resistência zero” (CRZ). A CRZ (Figura 2) é especificada em norma (EN 1995-1-2) como sendo 7 mm, o que reduz ainda mais o tamanho da seção transversal efetiva. Por conseguinte, esta é usada para prever a capacidade de carga restante em incêndio, assumindo que a seção transversal

reduzida mantém suas propriedades mecânicas iguais à temperatura ambiente (Wiesner *et al.*, 2017).

Figura 2 - Esquema de seção transversal carbonizada de viga com 3 faces expostas ao fogo



Fonte: Adaptado de Schmid *et al.*, 2015^b

É importante destacar que existe outro método para o cálculo da redução da seção de madeira chamado método da seção transversal efetiva (STE). O STE possui o mesmo princípio do STR, porém a diferença fundamental entre os dois métodos reside no fato de que enquanto no STE se considera uma seção residual equivalente a qual as propriedades da madeira não sofrem qualquer redução, a STR assume que a seção reduzida de madeira tem propriedades de resistência inferiores às da temperatura ambiente.

3.2 Trabalhos Experimentais para Validação da Teoria da STR

Neste item são apresentados os trabalhos experimentais que foram realizados para verificar o comportamento das paredes de MLCC em relação à sua resistência ao fogo. Conforme mencionado no item anterior, o método da seção transversal reduzida foi originalmente proposto por Schaffer, no ano de 1984, para estruturas de madeira lamelada colada submetidas à flexão. Contudo, esse método não pode ser aplicado para paredes de MLCC, pois em experimentos anteriores, Suzuki *et al.* (2016) descobriram que a flambagem

global foi o modo de falha dominante para este tipo de estrutura em ensaios padrão de resistência ao fogo.

Isso corrobora com o verificado em Schmid *et al.* (2010^a), ao afirmar que como a redução da rigidez é diferente da redução da resistência submetidas a mesma variação de temperatura e como a flambagem é governada por rigidez, o método não é diretamente aplicável a este tipo de fenômeno. Um modelo de projeto simples baseado no método de seção transversal efetiva já foi apresentado para o projeto estrutural ao fogo de painéis de MLCC em flexão no trabalho de Schmid *et al.* (2010^b). No entanto, este modelo também não é aplicado a paredes de MLCC, pois a falha para esse tipo de estrutura é governada pela flambagem por flexão, e não pela flexão.

A norma EN 1995-1-2 (CEN, 2004) sugere o método da seção transversal reduzida para madeiras. Porém, como visto, ele não é muito adequado para o dimensionamento de paredes de MLCC. Pensando nisso, a norma fornece o método simplificado e métodos de cálculos avançados para determinar a camada de resistência zero desses produtos.

A fim de investigar o desempenho de paredes de MLCC carregadas expostas a situação de incêndio, Schmid *et al.* (2015^a) realizaram ensaios de fogo até a falha, expondo as paredes sob carregamento à curva de fogo padrão ISO 834 (ISO, 1999). Em relação às paredes de MLCC com proteção (placas de madeira e placas de gesso cartonado tipo F), Schmid *et al.* (2015^a) concluíram que houve um comportamento térmico semelhante das placas de gesso acartonado e das placas de fibra usadas para proteger corpos de prova de MLCC. Os resultados indicaram que a taxa de carbonização medida das paredes de MLCC foi equivalente ao valor especificado na EN 1995-1-2 (CEN, 2004). Também mostraram que resultados dos cálculos avançados para a camada de resistência zero e profundidade residual se aproximaram dos resultados experimentais.

Em uma série de ensaios realizados por Schmid *et al.* (2015^b), verificou-se que os valores reais das resistências foram sempre superiores aos valores

característicos associados ao grau específico de cada madeira. Isso significa que o uso desses parâmetros resultaria em valores inferiores e não conservadores para camada de resistência zero. Estes valores foram incapazes de descrever o desempenho de suporte de carga dos elementos de madeira em compressão (paredes) testados em condição de incêndio. Schmid *et al.* (2015^b) ressaltaram que a determinação da camada de resistência zero com base nos experimentos descritos no artigo, mostrou um desvio significativo dos valores atuais apresentados na EN 1995-1-2 (CEN, 2004). Eles recomendaram que o STR fosse revisto com base nos resultados experimentais, bem como nos cálculos avançados propostos por Schmid *et al.* (2013).

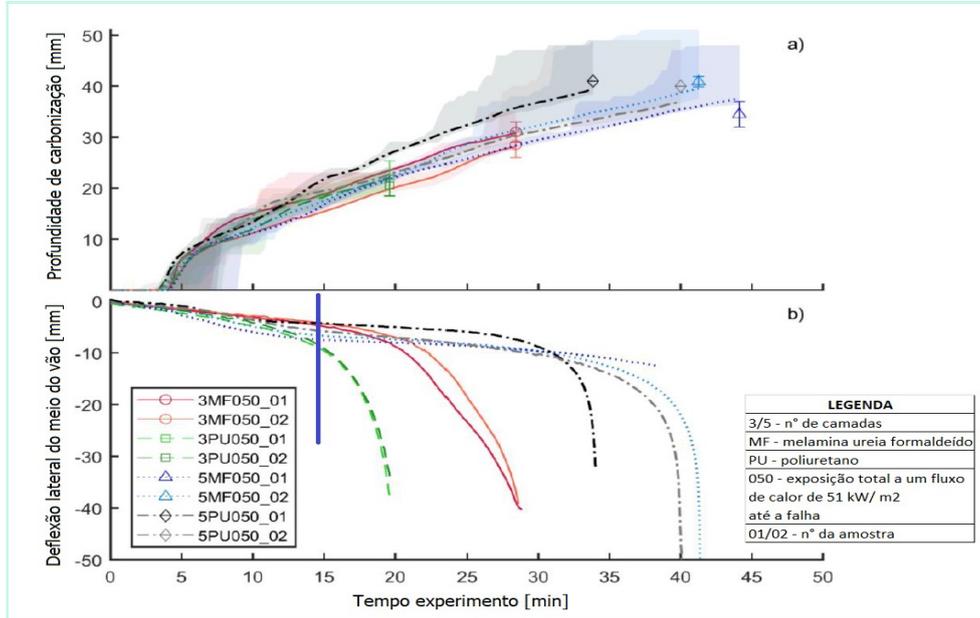
Em Wiesner *et al.* (2017), oito paredes de MLCC (de 3 camadas e de 5 camadas) foram ensaiadas para estudar suas respostas estruturais ao fogo enquanto foram submetidas a uma carga de compressão concêntrica constante equivalente a 10% ou 20% de sua capacidade ambiente teórica (usando propriedades mecânicas nominais). Os autores verificaram que os tempos de falha calculados não foram conservadores quando baseados em uma taxa de carbonização de 0,65 mm/min e uma CRZ de 7 mm. Para os autores, o método deve ser descartado e substituído por um mais avançado, principalmente quando os elementos estruturais de MLCC são aplicados em edifícios de múltiplos pavimentos. Wiesner *et al.* (2017) também verificaram que a falha das paredes foi dominada por momentos secundários e efeitos de instabilidade ligados às reduções na rigidez de flexão, em vez da perda de resistência do material. É recomendado, portanto, que esta área receba mais atenção, devendo ser consideradas as várias condições de contorno térmicas e estruturais.

Para abordar as lacunas de conhecimento descritas acima, o estudo mais recente de autoria de Wiesner *et al.* (2022) construiu uma configuração personalizada de carregamento e aquecimento simultâneo para controlar cuidadosamente as condições de contorno térmicas e mecânicas. O objetivo desta montagem foi trazer à luz o comportamento termomecânico de paredes

de MLCC feitas do mesmo tipo de madeira, mas com diferentes tipos de adesivos e espessuras de camada. Wiesner *et al.* (2022) verificaram que paredes de três camadas falharam significativamente mais cedo do que aquelas com cinco camadas reforçando a afirmação de Wiesner *et al.* (2017). Isso foi atribuído ao fato de que, em amostras de cinco camadas, a onda térmica e a frente de pirólise encontraram lamelas ortogonais de madeira que não contribuíram significativamente para a capacidade de carga e, portanto, agiram como 'camadas de sacrifício'. Com base nessas descobertas, o uso de paredes de MLCC de cinco camadas foi recomendado para obter maior desempenho ao fogo (Wiesner *et al.*, 2022).

Por fim, em concordância ao que foi obtido em Wiesner *et al.* (2017), os resultados relatados por Wiesner *et al.* (2022) demonstraram que as paredes falharam devido à instabilidade global. Conforme a Figura 3, a partir de um dado momento as deflexões laterais aumentam exponencialmente, indicando escoamento compressivo como a principal causa de falha (por exemplo o corpo de prova 3PU050_01 – com 5 camadas com adesivo de PU –, a partir da linha azul, apresenta esse comportamento). Mais pesquisas foram recomendadas para uma melhor compreensão das perdas de rigidez à compressão para o projeto estrutural de incêndio de MLCC e de outros sistemas de madeira maciça (Wiesner *et al.*, 2022).

Figura 3 - a) Profundidades de carbonização e b) Deflexões laterais a meia altura para paredes de MLCC até a falha



Fonte: Adaptado de Wiesner et al., 2022

3.3 Trabalhos de Simulação Numérica sobre o Comportamento de Parede e MLCC em Situação De Incêndio

Segundo Nassif *et al.* (2014), a classificação de resistência ao fogo das paredes divisórias está sujeita à certificação antes de poderem ser utilizadas na construção. Não obstante, o processo de certificação é caro, pode ser necessário repetidas tentativas experimentais e a disponibilidade de instalações credenciadas para realização de ensaios de incêndio são muito limitadas. Portanto, torna-se necessário desenvolver ferramentas numéricas ou computacionais para simular o comportamento de componentes estruturais de MLCC ao fogo de forma a reduzir custos ou tempo de resposta, considerando as suas devidas limitações.

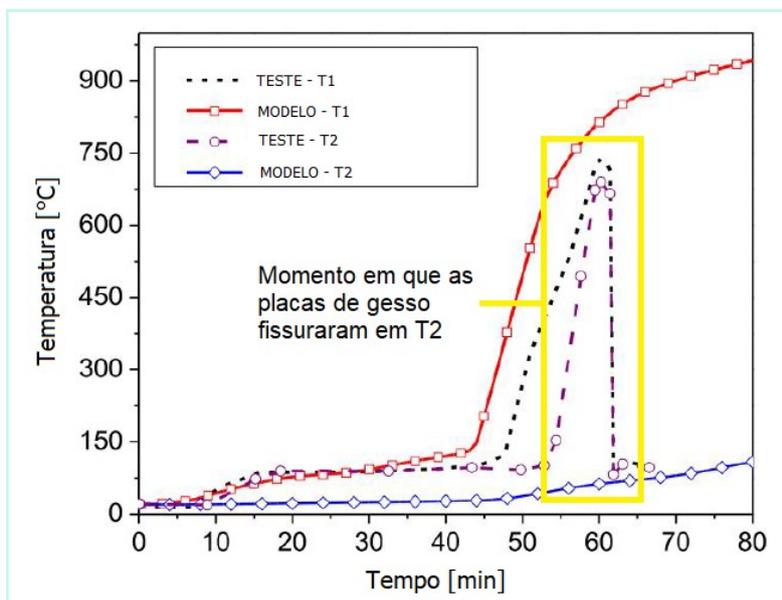
Na análise numérica do comportamento térmico de um elemento de madeira sob fogo, a modelagem da pirólise é essencial para prever com precisão as distribuições realistas de temperatura na seção da madeira.

Segundo Ganaoui *et al.* (2017), apesar da existência abrangente de modelos analíticos para a pirólise, as simulações de elementos finitos disponíveis na literatura para a madeira exposta ao fogo, frequentemente empregam propriedades termofísicas como função da temperatura a fim de levar em consideração os fluxos de calor induzidos pela pirólise. Tendo isso em vista, Ganaoui *et al.* (2017) propuseram a implementação de um modelo preditivo de elementos finitos multifísicos no software Abaqus através de uma sub-rotina chamada UMATHT, onde as diferentes reações envolvidas na pirólise foram consideradas implicitamente por meio de propriedades termofísicas das madeiras gradualmente modificadas.

Nesse contexto, Thi *et al.* (2018) apresentaram uma metodologia numérica para simular a resistência ao fogo de sistemas de parede à base de madeira em escala real, utilizando a sub-rotina UMATHT. A novidade do trabalho apresentado por Thi *et al.* (2018) em relação à literatura existente, que trata do comportamento de estruturas de madeira sob fogo, foi de que as fontes de energia (endotérmica e exotérmica) envolvidas na pirólise da madeira exposta ao fogo, foram explicitamente levadas em consideração na equação do balanço de energia em vez de propriedades termofísicas gradualmente modificadas.

A Figura 4 ilustra o aumento de temperatura previsto numericamente em termopares em comparação com as medições experimentais. Verificou-se que até cerca de 48 minutos, as previsões numéricas foram razoáveis em comparação com os experimentos. Após esse tempo, o modelo experimental T2 apresentou um rápido aumento das temperaturas. Isso correspondeu ao momento em que as placas de gesso fissuraram e se desintegraram, expondo a lã mineral e levando à exposição direta dos termopares ao fogo (Thi *et al.*, 2018).

Figura 4—Evolução da temperatura na parede de MLCC com face de gesso.



Fonte: Adaptado de Thi *et al.*, 2018

Em Tranet *al.* (2022), foram realizadas investigações experimentais e numéricas para avaliar a resistência estrutural relativa ao fogo da madeira de abeto termo-mecanicamente comprimida. Além disso, um modelo preditivo de elementos finitos de pirólise em três etapas foi desenvolvido e implementado com sucesso no software Abaqus por meio da rotina UMATHT. Os perfis térmicos simulados, a perda de massa, bem como as profundidades de carbonização, foram comparados com os resultados registrados experimentalmente, demonstrando relevante concordância. Não cabe trazer todos os gráficos para este artigo pois não é o objetivo, mas como exemplo, a diferença média entre as profundidades de carbonização experimentais e numéricas foi de 12%. No entanto, os autores afirmaram que o modelo atual precisa de validação em altas temperaturas (>700°C) devido à ausência de todos os processos químicos observados experimentalmente.

4 ADESIVOS E DELAMINAÇÃO EM ALTAS TEMPERATURAS

4.1 ADESIVOS

Um dos principais componentes para os elementos estruturais de MLCC são os adesivos usados para unir as lamelas e formar os painéis. De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), adesivos resistentes ao fogo são aqueles capazes de manter as camadas unidas sobre uma determinada carga, em um certo período de tempo, quando submetidos a uma situação de incêndio. Logo, observa-se que esse material é muito influente no desempenho de painéis de MLCC quando expostos ao fogo.

Nesse contexto, no trabalho de Wiesner *et al.* (2022), foram ensaiadas paredes de MLCC com dois principais tipos de adesivos usados pela indústria, resina de melamina-ureia-formaldeído (MUF) e poliuretano monocomponente (PU). Os resultados mostraram que as amostras coladas com adesivo PU defletiram mais rapidamente e falharam mais cedo do que aquelas coladas com adesivo MUF. Considerando os tempos de falha para amostras individuais ensaiadas sob exposições de alto fluxo de calor, foi observado que o tempo que a capacidade de carga é mantida sob aquecimento pode ser aumentado de 20 min para mais de 40 min, simplesmente pela mudança do tipo de adesivo (de PU para MUF). Isso corroborou com alguns estudos anteriores (Clauß; Joscak; Niemz, 2010 – Zelinka *et al.*, 2019), no qual mostraram que os adesivos de MUF, por serem mais rígidos e reticulados, apresentaram desempenho melhor em temperatura elevada do que as formulações de PU (Wiesner *et al.*, 2022).

Em ensaios realizados em paredes de MLCC por Westhuyzen *et al.* (2020), foram observadas as formações de vazios entre as lamelas individuais nas camadas, sendo isso, visto como uma das principais razões para falha local das paredes. Durante o ensaio em altas temperaturas, a largura do vão entre as lamelas adjacentes aumentou significativamente, permitindo assim um caminho para a migração do fogo. Portanto, pode ser útil investigar o efeito da colagem de bordas em combinação com a colagem de face, a fim de evitar que

as chamas avancem entre as lamelas adjacentes. Por conseguinte, se o adesivo for suficientemente resistente ao calor, isso poderá atrasar a carbonização bidimensional, diminuindo a taxa geral de carbonização da parede de MLCC (Westhuyzen *et al.*, 2020).

4.2 Delaminação

A aderência entre lamelas é um fator importante para garantir a resistência dos painéis de MLCC. O fenômeno de delaminação é o evento da redução da força de aderência do adesivo, o que resulta no desprendimento da lamela mais externa de um elemento de MLCC da sua subjacente. Uma das circunstâncias em que esse fenômeno ocorre é quando o painel é exposto a uma situação de incêndio. Por conseguinte, ocorre uma perda do isolamento de proteção fornecidos pela camada carbonizada à madeira subjacente, resultando na exposição de uma nova camada, o que reacende o fogo e aumenta a extensão da carbonização (Westhuyzen *et al.*, 2020). É importante destacar que durante a delaminação, as camadas deixam de atuar de forma solidarizadas, resultando em uma redução da inércia da seção transversal do elemento estrutural. A Figura 5 ilustra a região de ocorrência da delaminação com uma parte da lamela descolada.

Figura 5 - Delaminação ocorrendo em amostras de pinus



Fonte: Adaptado de Westhuyzen et al., 2020

Em muitos casos, a taxa de carbonização da MLCC pode ser maior do que a de madeira maciça, visto que as ligações imperfeitas e os vazios entre as camadas aceleram a carbonização. Em estudo recente sobre taxa de carbonização em MLCC, Klippel e Schmid (2018) observaram que a MLCC tem comportamento e taxa de carbonização semelhantes às da madeira maciça caso não ocorra delaminação. Porém, caso isso aconteça, a taxa de carbonização aumenta rapidamente.

Em Johansson e Svenningsson (2018), painéis de MLCC foram ensaiados em um forno com medidas internas de 1,0 m x 1,0 m x 1,0 m. Os resultados analisados indicaram que a delaminação de elementos de MLCC pode ter um impacto severo no desenvolvimento global do incêndio, causando oreacendimento da madeira fresca, impedindo a autoextinção e prolongando a duração do incêndio. Segundo os autores, após a delaminação, as temperaturas ficaram mais altas, a carbonização mais profunda e o fluxo de calor atingiu o pico. Para eles, ficou claro que a delaminação pode anular a fase de decadência e estender a duração do incêndio.

Westhuyzen *et al.* (2020) investigaram a resistência ao fogo das paredes de MLCC fabricados a partir de pinho e eucalipto da África do Sul e coladas com adesivo de PU. Os ensaios de incêndio foram realizados com base na curva de incêndio padrão ISO 834. Eles obtiveram como resultado uma taxa média de carbonização das paredes de MLCC de pinus SA e de eucalipto de 0,95 mm/min e 0,76 mm/min, respectivamente. Esses valores são superiores à taxa de carbonização (0,61 mm/min e 0,68 mm/min) encontradas por Klippel (2014), Stora Enso (2012) e Teibinger e Matzinger (2010). Segundo Westhuyzen *et al.* (2020), é possível que essa diferença tenha ocorrido devido a variações nas propriedades físicas, como, por exemplo, a densidade da madeira do local em comparação com a madeira utilizada como referência para as normas técnicas. Neste sentido, isso aponta a necessidade de realizar estudos em paredes de MLCC que utilizem madeiras produzidas no Brasil, afim de verificar possíveis divergências com os produtos utilizados como referência no exterior.

5.COMPORTAMENTO PÓS INCÊNDIO

Após um incêndio ser extinto, surgem duas questões principais aos engenheiros estruturais: (1) se as paredes danificadas possuem resistência para suportar a carga da estrutura para garantir um resgate seguro; (2) se a capacidade de carga residual da parede satisfaz o requisito para uma posterior vida útil. Logo, uma extensa pesquisa sobre os componentes de madeira pós-incêndio precisa ser realizada, principalmente em relação as paredes de MLCC, visto que tem-se como objetivos construir prédios de altura elevada.

Entretanto, segundo Bai *et al.* (2021^b), um dos problemas principais é encontrar um método experimental e numérico adequado para avaliar a resistência após incêndio de paredes de MLCC. Embora uma quantidade considerável de pesquisas tenha sido dedicada ao desempenho de paredes de MLCC ao fogo, menos atenção tem sido dada à capacidade de carga residual dessas após o incêndio.

Nesse contexto, Bai *et al.* (2021^a) realizaram ensaios para investigar a capacidade de carga à compressão residual das paredes de MLCC (3 e 5 camadas) após exposição ao fogo em apenas uma das faces, a fim de propor uma nova solução analítica para o cálculo da capacidade residual. Os corpos de prova, sem e com exposição ao fogo, foram submetidos a ensaio de compressão axial. É importante ressaltar que nenhuma carga foi aplicada durante o ensaio para garantir a configuração das paredes até a extinção do fogo.

Como resultado, Bai *et al.* (2021^a) mostraram que nos ensaios de capacidade de carga à compressão residual, realizado à temperatura normal, o modo de falha das paredes de MLCC mudou de compressão axial típica para a compressão excêntrica. Isso corrobora com os resultados encontrados por Suzuki *et al.* (2016), ao mostrarem que para as paredes submetidas à exposição ao fogo de apenas uma das faces, a carbonização assimétrica alterou gradualmente o modo de compressão axial para compressão excêntrica.

Por fim, Bai *et al.* (2021^a) desenvolveram um método para calcular a capacidade de carga de compressão residual após o incêndio. Os erros relativos entre a capacidade de carga residual calculada (a partir das fórmulas derivadas desenvolvidas no próprio artigo) e os resultados dos ensaios, variaram de -27,84% a 4,71%, indicando que as fórmulas forneceram uma previsão satisfatória das paredes de MLCC (Bai *et al.*, 2021^a).

A principal teoria empregada para a derivação das fórmulas que resultaram na capacidade de carga residual, foi a teoria de flexão de vigas de Timoshenko, além dos modelos teóricos - a equação genérica da temperatura para a camada de resistência zero proposto por Janssens e White (1994) - para calcular as propriedades mecânicas da seção transversal residual após o incêndio. Ainda assim, não existem muitos artigos utilizando como metodologia ensaios de carregamento com o objetivo de investigar a capacidade residual de paredes de MLCC expostas ao fogo, bem como são

raros os métodos que utilizam simulação de elementos finitos para este fim. Além disso, existem limitações nesses ensaios físicos como, por exemplo, a impossibilidade de inserção de termopares em todo o corpo de prova durante os ensaios, gerando apenas valores médios ou pontuais de temperatura do elemento (Bai *et al.*, 2021^b).

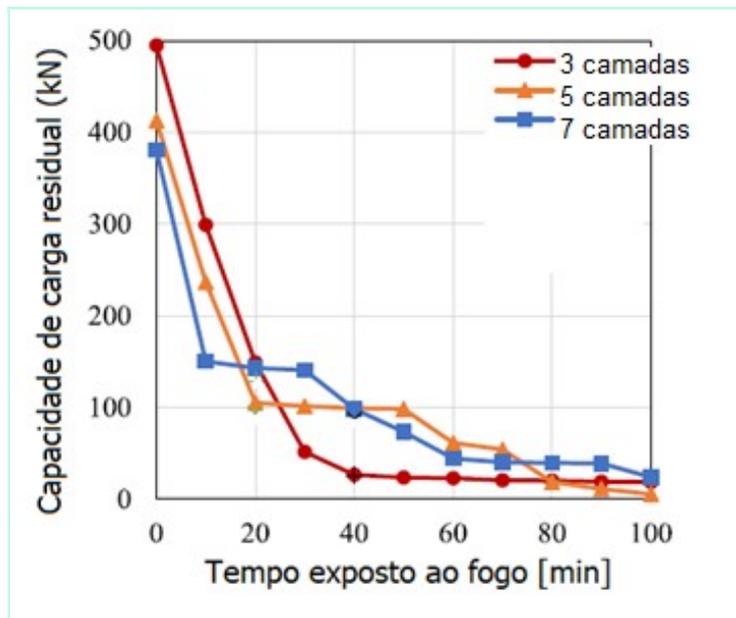
Pensando nisso, Bai *et al.* (2021^b) estudaram a capacidade de carga residual da parede de MLCC após o incêndio através da realização de ensaios e modelos numéricos. Para isso, foi estabelecida uma abordagem numérica para determinar a capacidade de carga residual com base nos fenômenos experimentais e nos requisitos das paredes de MLCC. Portanto, um modelo de simulação através do método dos elementos finitos, no software Abaqus, foi desenvolvido e verificado com exemplos típicos.

Os resultados positivos das comparações mostraram que os modelos empregados são ferramentas eficazes que contribuem para uma melhor compreensão dos comportamentos mecânicos das paredes de MLCC em múltiplas etapas físicas. A partir dos resultados dos ensaios, percebeu-se que a capacidade de carga residual das paredes de MLCC, após o incêndio, está intimamente relacionada ao tempo de combustão e ao número de camadas, tendo em vista que as condições básicas como tamanhos gerais de corpos de prova e condições de contorno, são iguais nos dois casos. As capacidades de carga residual das paredes de MLCC com camadas variadas foram calculadas pelos modelos numéricos à medida que o fogo avançava, conforme representação na Figura 6 (o número na legenda indica a quantidade de camadas). A partir desse modelo, foi possível verificar que após o incêndio, o declínio da capacidade residual das paredes de MLCC com mais camadas foi relativamente menor em relação às paredes com poucas camadas (Bai *et al.*, 2021^b).

Por fim, os autores sugeriram que um projeto estrutural em situação de incêndio deve investigar a capacidade de carga residual em outros tipos de componentes estruturais diferentes das paredes de MLCC, bem como as

conexões de madeira. Para simular a condição real de serviço em uma estrutura de madeira, várias condições de carregamento também devem ser levadas em consideração (Bai *et al.*, 2021^b).

Figura 6 - Capacidades de carga residual em paredes de MLCC



Fonte: Adaptado de Bai *et al.*, 2021^b

6 CONCLUSÃO

As seguintes conclusões que provêm deste referencial teórico são apresentadas abaixo:

- Os autores referenciados neste trabalho convergiram em afirmar que o método da seção transversal reduzida não pode ser aplicado para paredes de MLCC. Concluíram que o conceito de camada de resistência zero atual é uma aproximação pouco eficiente para se aplicar em materiais complexos como a MLCC quando exposta ao fogo, e avaliaram que devido a isso, existe a necessidade de criar novos métodos;
- Diversos autores verificaram que paredes de três camadas falharam significativamente mais cedo do que aquelas com cinco camadas. Portanto, com base nos trabalhos citados, o uso de paredes de MLCC

de cinco camadas é recomendado para obter maior desempenho referente ao fogo;

- A falha das paredes foi dominada por momentos secundários e efeitos de instabilidade ligados às reduções na rigidez de flexão, ao invés da perda de resistência do material como se acreditava. Mais pesquisas são recomendadas para uma melhor compreensão das perdas de rigidez à compressão e das deflexões laterais acumuladas para o projeto estrutural de incêndio de MLCC;
- Os autores concordaram que os adesivos de MUF, por serem mais rígidos e reticulados, apresentaram melhor desempenho em temperatura elevada do que as formulações de PU. Porém, é necessário investigar o efeito da colagem de bordas em combinação com a colagem de face, a fim de evitar que as chamas penetrem entre as lamelas adjacentes;
- A face inferior dos painéis utilizados como laje de MLCC serão mais suscetíveis à delaminação do que as paredes devido à ação da gravidade, de modo que isso pode causar efeitos severos na integridade. Pesquisas futuras devem se concentrar tanto no tipo de adesivo, quanto na espessura da camada para resistência ao fogo dos painéis;
- A revisão mostrou que é necessário que se realizem estudos em paredes de MLCC que utilizem as madeiras produzidas no Brasil, a fim de verificar as possíveis divergências com os produtos do exterior e como isso afetará o material na sua resistência ao fogo;
- É necessário aprofundar métodos numéricos para criar modelos que simulem a capacidade de carga residual da parede de MLCC após o incêndio. Apesar do modelo criado por Bai *et al.* (2021^b) ter funcionado, os autores sugeriram que é preciso aprimorá-lo, levando em consideração as várias condições de carregamento.

Este trabalho forneceu uma compreensão do estado do conhecimento sobre o comportamento de paredes de MLCC em situação de incêndio.

Espera-se que o trabalho sirva de motivação para pesquisas futuras que envolvam o comportamento ao fogo de estruturas de madeira em geral, mais especificamente as madeiras engenheiradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7190 2022**: Projeto de estrutura de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.

Almeida, A. C. de; Hirosawa, J. L.; Mariano, I. M.; Silva, R. D. Panorama internacional e nacional do uso e aplicação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT. **Conjecturas**, v. 22, n. 13, p. 672-701, 2022.

Amiri, A.; Ottelin, J.; sorvari, J.; Junnila, S. *Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings*. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, 2020.

Bai, Y.; Zhang, J.; Shen, H. *Experimental and numerical analysis of residual load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after fire*. **Structures**, v. 30, p. 50-61, 2021^b.

Bai, Y.; Zhang, J.; Shen, H. *Residual compressive load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after exposed to one-side fire*. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021^a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Nacional de Informações Florestais. Florestas Naturais**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>>. Acesso em: ago. 2022.

CEN – European Committee for Standardization. **CEN EN 1995-1-2 2004 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design**. Bruxelas: CEN, 2004.

Chen, J.; Ter-Mikaelian, M. T.; Yang, H.; Colombo, S. J. *Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada*. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 91, n. 2, p. 193-205, 2018. Oxford University Press (OUP).

Clauß, S.; Joscak, M.; Niemz, P. *Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests*. **European Journal Of Wood And Wood Products**, v. 69, n. 1, p. 101-111, 5 fev. 2010.

Conrad, M.P.; Smith, G.D.; Fernlund, G. *Fracture of wood composites and wood adhesive joints: A comparative review*. **Wood and Fiber Science**, v. 36, p. 26–39, 2004.

Cowlard, A.; Bittern, A.; Abecassis-Empis, C.; Torero, J. L. *Some Considerations For The Fire Safe Design Of Tall Buildings. International Journal Of. Some Considerations for the Fire Safe Design of Tall Buildings*. **International Journal Of High-Rise Buildings**, Coreia do Sul, v. 2, n. 1, p. 63-77, 2013

Cunha, A. B. da; Matos, J. L. M. de. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo. **RevistaÁrvore**, v.34, n. 2, p. 345-354, 2010.

Dziurka, D.; Kawalerczyk, J.; Walkiewicz, J.; Derkowski, A.; Mirski, R. *The Possibility to Use Pine Timber Pieces with Small Size in the Production of Glulam Beams*. **Materials**, v. 15, n. 9, 2022.

D'amico, B.; Pomponi, F.; Hart, J. *Global potential for material substitution in building construction: the case of cross laminated timber*. **Journal Of Cleaner Production**, v. 279, 2021.

Johansson, E.; Svenningsson, A. *Delamination of Cross-laminated timber and its impact on fire development: focusing on different types of adhesives*. Lund: Lund University, 2018. 182 p. Report 5562.

Figuerola, M. J. M.; Moraes, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **AmbienteConstruído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

Ganaoui, M. El; Thi, V.D.; Khelifa, M.; Oudjene, M.; Rogaume, Y. *Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire*. **Engineering Structures**, v. 143, p. 11-21, 2017.

Goina, M. *Fire resistance of cross-laminated timber wall panels*, University of Trieste, Trieste, Italy, 2010.

Hayajneh, Suhaib Mohammad. *Numerical Simulation of Fire Spread in Multi-Story Cross Laminated Timber Buildings*. 2022. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculty Of Science, Swinburne University Of Technology, Melbourne, 2022.

Henek, V.; Venkrbec, V.; Novotný, M. *Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber Panels*. **Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 95, n. 6, 2017.

Himes, A.; Busby, G. *Wood buildings as a climate solution. Developments in the Built Environment*, v. 4, 2021.

Huber, J. A. J.; Bitá, H. M.; Tannert, T.; Berg, S. *Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems. Engineering Structures*, v. 240, 2021.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 834: 1999: Fire-resistance tests—Elements of building construction—Part 1: General requirements. International organisation for standardisation.** Geneva: ISO, 1999.

Janssens, M.L.; White, R.H. *Short communication: temperature profiles in wood members exposed to fire. Fire Mater*, v. 18, p. 263–265, 1994.

Jeleč, M.; Varevac, D.; Rajčić, V. *Cross-laminated timber (CLT): a state of the art report. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, v. 70, n. 02, p. 75-95, 2018.

Jiang, F.; Li, T.; Li, Y.; Zhang, Y.; Gong, A.; Dai, J.; Hitz, E.; Luo, W.; Hu, L. *Wood-Based Nanotechnologies toward Sustainability. Advanced Materials*, v. 30, n. 1, 2018.

Klippel, M. **Fire safety of bonded structural timber elements.** 2014. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, EthUniversity, Zurich, 2014.

Kuzmanovska, I.; Gasparri, E.; Tapias, D.; Monne, M. A. *Tall timber buildings: emerging trends and typologies. In: World Conference on Timber Engineering, 2018, Coreia do Sul. COEX Convention & Exhibition Center in Seoul, Coreia do Sul, 2018.*

Lam, F.; Oh, J. *Performance of Canadian glulam columns with new laminae e requirements. Engineering Structures*, v. 172, p. 85-93, 2018.

Le, T. Van; Ghazlan, A.; Ngo, T.; Remennikovm A.; Kalubadanagem D.; Chern Jinn Gan, E. *Dynamic increase factors for Radiata pine CLT panels subjected to simulated out-of-plane blast loading Eng Struct. Engineering Structures*, 2020. p. 225, 2020.

Liang, S.; Gu, H.; Bergman, R. *Environmental Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis of a High-Rise Mass Timber Building: a case study in pacific northwestern united states. Sustainability*, v. 13, n. 14, 2021.

Malhotra, H. L.; Rogowski, B. F. *Fire resistance of laminated timber columns. Fire Research Note*, n. 671, 1967.

Nakamura, J. Madeira engenheirada é opção estrutural para edificações. *In: Construmarket. revistadigital*. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/madeira-engenheirada-e-opcao-estrutural-para-edificacoes/20655>> Acesso em: 17 out. 2022.

Nassif, A.Y.; Yoshitake, I.; Allam, A. *Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls*. **Construction and Building Materials**, v.59, p. 51-61, 2014.

Rovaris, C.; **Estudo para a ampliação do uso da madeira na construção de habitações no Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

Santis, Y. de; Aloisio, A.; Sciomenta, M.; Fragiaco, M. *Capacity model of CLT walls with openings and timber plasticization*. **Engineering Structures**, v. 264, 2022.

Schaffer, E.L. *Structural Fire Design: Wood*. **Forest Products Laboratory**, Madison, DTIC Document, 1984.

Schmid, J.; Koñ Nig, J. *Light timber frame constructions with solid timber members—Application of the reduced cross-section method*. *In: Proceedings of CIB W18-Meeting 43*, Nelson, New Zealand, 2010. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 2010^a.

Schmid, J. Koñ Nig, J.; Koñ Hler, J. *Fire-exposed cross-laminated timber—Modelling and tests*. *In: Proceedings of World Conference on Timber Engineering 2010*, Riva del Garda, Trentino, Italy, 2010^b.

Schmid, J.; Menis, A.; Fragiaco, M.; Clemente, I.; Bochicchio, G. *Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions*. **Fire Technology**, v. 51, n. 6, p. 1341-1370, 2015^a.

Schmid, J.; Just, A.; Klippel, M.; Fragiaco, M. *The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and Determination of the Zero-Strength Layer*. **Fire Technol**, v. 51, p. 1285–1309, 2015^b.

Schmid, J.; Menis, A.; Fragiaco, M.; Bostrom, L.; Just, A.; Gustafsson, A.; Bochicchio, G. *The load bearing performance of CLT wall elements in large-scale fire tests*. *In: 13th International Fire Science and Engineering Conference*

INTERFLAM 2013, Royal Holloway Collage, University of London (UK), p. 1143–1156, 2013.

Segundinho, P. G. A.; Neto, C. C.; Dias, A. A.; Junior, C.C.; Christoforo, A. L. *Evaluation of Brazilian reforestation species in glulam beams before and after preservative chemical treatments.* **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, p. 192-195, 2014.

Shigue, E. K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos.** 2018. 250 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Silva, T. D.; Narques, T. V. N.; Almeida, J. P. B.; Christoforo, A. L. Variação da capacidade resistente de vigas de madeira em situação de incêndio. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do Ifpb**, n. 57, 2021.

Skidmore, O.; Merrill, L.L.P. **Timber Tower Research Project.** Report. 2013. 105p.

Stark, N. M.; Cai, Z.; Carll, C. *Wood handbook: wood as an engineering material.* **General Technical Report Fpl**, Madison, Wi :U.s. Dept. Of Agriculture, v. 100, p. 11.1-11.28, 2010.

Stora Enso. CLT by Stora Enso. Helsinki: Stora Enso, 2012.

Sturzenbecher, R.; Hofstetter, K.; Bogensperger, T. H.; Schickhofer, G.; Eberhardsteiner, J. *Development of high-performance strand boards: engineering design and experimental investigations.* **Wood Sci. Technol**, v. 44, p. 13–29, 2010.

Suzuki, J.; Mizukami, T.; Naruse, T.; Araki, Y. *Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure.* **Fire Technology**, v. 52, n. 4, p. 1015-1034, 18 mar. 2016. Springer Science and Business Media LLC.

Teibinger, M.; Matzinger, I. *Basis for evaluation of the fire resistance of timber constructions: Final report.* **Holzforschung Austria**, 2010.

Tran, T.T.; Thi, V.-D.; Oudjene, M.; Khelifa, M.; Girods, P.; Debal, M.; Rogaume, Y.; Jannot, Y. *Fire structural performance of thermo-mechanically compressed spruce timber by means experiments and a three-step multi-reactions pyrolysis 3D-finite element modelling.* **Construction And Building Materials**, v. 320, p. 126100, 2022.

Thi, V.D.; Khelifa, M.; Oudjene, M.; ElGanaoui, M.; Rogaume, Y. *Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall.* **International Journal of Thermal Sciences**, v. 132, p. 96-103, 2018.

Westhuyzen, S.; Walls, R.; Koker, N. *Fire tests of South African cross-laminated timber wall panels: fire ratings, charring rates, and delamination.* *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, v. 62, n. 1, p. 33-41, 2020.

Wiesner, F.; Bisby, L. *The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis.* **Fire Safety Journal**, v. 107, p. 114-125, 2019.

Wiesner, F.; Hadden, R.; Deeny, S.; Bisby, L. *Structural fire engineering considerations for cross-laminated timber walls.* **Construction and Building Materials**, v. 323, 2022.

Wiesner, F.; Randmael F.; Wing Wan F.; Bisby, L.; H, R. M. *Structural response of cross-laminated timber compression elements exposed to fire,* **Fire Safety Journal**. v. 91, p. 56-67, 2017.

Zelinka, S. L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechle, N. J.; Rammer, D. R.; Hasburgh, L. E. *Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperatures.* **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, v. 95, p. 102436, dez. 2019. Elsevier BV.