

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPE RISBACIK

**REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE
MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Porto Alegre

Outubro de 2022

FELIPE RISBACIK

**REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE
MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Professora Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre

Outubro de 2022

FELIPE RISBACIK

**REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE
MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)

Dra. pela *University of Sheffield*, Inglaterra

Orientadora

Prof. Enio Carlos Mesacasa Junior (UFRGS)

Dr. pela Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Brasil

Prof. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha companheira Bárbara,
à minha mãe Rosana e ao meu pai Alair, pelo apoio e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo suporte emocional e financeiro para que eu pudesse cursar o ensino superior. Agradeço por desde a minha infância se preocuparem com minha educação. Sei dos sacrifícios que fizeram para que eu pudesse estudar. Sei que não tiveram o mesmo acesso à educação que me propiciaram e agradeço às pessoas que deram ao menos algum tipo de suporte a vocês. Minha gratidão a eles, pois fazem parte da nossa história.

Agradeço ao suporte dos amigos que criei na faculdade e que espero levar para a vida toda. Foram momentos inesquecíveis, de cansaço e principalmente de alegria. Não me esquecerei dos momentos que passamos juntos e principalmente dos célebres churrascos na Lopo Gonçalves 485.

Agradeço a uma grande mulher, minha companheira Bárbara, ao seu suporte e ao seu amor. O amor é construção e os pilares para essa construção são o diálogo e o respeito, características que cultivamos muito entre nós dois. Não disponho de habilidade para expressar com palavras o amor que sinto por ela, assim tomarei as palavras do poeta Chorão: “Aprendendo todo dia, me espelho em você, corro junto com você, vivo junto com você, faço tudo por você.”

Agradeço à Professora Ângela Gaio Graeff, por quem tenho profundo respeito e admiração, por ter aceitado ser orientadora deste trabalho. Desde o início, sempre tive seu apoio e entusiasmo em relação ao tema do trabalho, mesmo este sendo pouco estudado no Brasil. Agradeço por sua dedicação e principalmente pelo aprendizado.

Agradeço ao Estado Brasileiro por manter a faculdade pública e gratuita. Espero que um dia todos os brasileiros possam ter acesso universal a ela. Por fim, agradeço à comunidade acadêmica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo seu esplendido trabalho e pela contribuição na minha formação pessoal e na minha carreira profissional.

RESUMO

A busca por soluções construtivas alternativas e mais ecológicas tem se desenvolvido nos últimos anos, principalmente no que diz respeito ao uso da madeira. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC), pelas suas propriedades otimizadas, tem sido vista como capaz de tornar realidade a ambição de construir em altura com madeira. Devido a isso, os painéis de MLCC estão sendo amplamente utilizados como paredes com função estrutural, pois tornam possível a construção de edifícios altos. Entretanto, em caso de incêndio, isso significa que, durante toda a duração da queima, os elementos de parede MLCC devem manter uma capacidade de carga suficiente para a manutenção do equilíbrio da estrutura, a fim de evitar o colapso e possibilitar a evacuação do edifício e o combate ao incêndio. Ademais, apenas por ser um material combustível, seu uso como elemento estrutural é muito questionado na sociedade brasileira, pois conduz a população à falsa conclusão de que a madeira não é resistente ao incêndio visto que permite um crescimento rápido do fogo e conseqüentemente prejudica a segurança estrutural do sistema. Dessa forma, é categórica a necessidade de se realizar mais estudos voltados ao desempenho dos painéis de MLCC em relação à resistência à temperatura e de difundir essa informação amplamente, para provar que são tecnicamente viáveis. Nesse sentido, este trabalho de conclusão propõe-se a realizar um referencial teórico sobre a problemática do comportamento de paredes de MLCC em situação de incêndio no âmbito nacional e internacional. Como metodologia, foi realizada uma busca pelas palavras-chave nas plataformas com as quais a UFRGS possui convênio (EBSCO host, Google acadêmico nacional, Google acadêmico internacional, Science Direct, Acervo periódico CAPES) e os artigos encontrados serviram de fonte para a elaboração desse estudo. Através destas pesquisas, foram selecionadas 87 publicações e entre estas, apenas nove artigos possuíam como tema a resistência ao fogo de paredes de MLCC. Estes foram utilizados como fonte principal para a construção desse referencial. Como resultados alcançados, foi obtida uma compreensão do estado do conhecimento sobre a resistência de paredes de MLCC, sendo ordenado periodicamente o conjunto dessas informações, os resultados já obtidos e quais assuntos ainda é preciso investigar.

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

ABSTRACT

The search for alternative and more ecological constructive solutions has been developed in recent years, especially with regard to the use of wood. Cross-laminated timber (CLT), due to its optimized properties, has been seen as capable of making the ambition of building tall with wood a reality. Due to this, CLT panels are being widely used as walls with structural function, as they make it possible to construct tall buildings. However, in the event of a fire, this means that, throughout the duration of the burn, the CLT wall elements must keep a sufficient load capacity to maintain the balance of the structure, in order to prevent collapse and enable the evacuation of the building, and firefighting. In addition, only because it is a combustible material, its use as a structural element is much questioned in Brazilian society, as it leads the population to the false conclusion that wood is not fire resistant as it allows a rapid growth of fire and consequently impairs structural safety of the system. Thus, there is a categorical need to carry out more studies aimed at the performance of CLT panels in relation to temperature resistance and to disseminate this information widely, to prove that they are technically feasible. In this sense, this final work proposes to carry out a theoretical reference on the problem of the behavior of CLT walls in a fire situation at the national and international level. As a methodology, a search for keywords was carried out on the platforms with which UFRGS has an agreement (EBSCO host, Google national academic, Google international academic, Science Direct, CAPES periodical collection) and the articles found served as a source for the elaboration of this study. Through these researches, 87 publications were selected and among these, only nine articles had as their theme the fire resistance of CLT walls. These were used as the main source for the construction of this reference. As results achieved, an understanding of the state of knowledge on the strength of CLT walls was obtained, with the set of information being periodically ordered, the results already obtained and which subjects still need to be investigated.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição estrutural da madeira lamelada colada cruzada.	12
Figura 2 - Dalston Works	13
Figura 3 - Artigos encontrados por plataforma	18
Figura 4 - Quantidade de artigos por classificação.....	21
Figura 5 - Mapa da localização dos artigos utilizados neste referencial teórico	23
Figura 6 - Loja Dengo	25
Figura 7 - Publicações internacionais de artigos sobre MLCC em situação de incêndio.....	28
Figura 8 - Seção carbonizada.....	30
Figura 9 - Noções básicas do método de seção transversal reduzida	30
Figura 10 - a) Profundidades de carbono e b) Deflexões laterais a meia altura para paredes de MLCC até a falha.	35
Figura 11 - Comparação entre aumentos de temperatura previstos numericamente com os registrados experimentalmente nos termopares T1 e T2 para parede de MLCC com face de gesso.	36
Figura 12 - Delaminação ocorrendo em amostras de pinus.....	38
Figura 13 - Modelo das capacidades de carga residual em paredes de MLCC.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Plataforma EBSCO host.....	18
Tabela 2 - Plataforma ScienceDirect.....	19
Tabela 3 - Plataforma Google Acadêmico 1.....	19
Tabela 4 - Plataforma Google Acadêmico 2.....	19
Tabela 5 - Plataforma Google Acadêmico 3.....	19
Tabela 6 - Plataforma Acervo periódico Capes 1.....	20
Tabela 7 - Plataforma Acervo periódico Capes 2.....	20
Tabela 8 - Artigos selecionados para o referencial teórico.....	22
Tabela 9 - Resultados de testes de fogo e do método de cálculo.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVO	15
1.3 METODOLOGIA.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	18
3 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE AS PAREDES DE MLCC	24
3.1 CENÁRIO NACIONAL.....	24
3.2 CENÁRIO INTERNACIONAL	27
4 RESISTÊNCIA DE PAREDES DE PAINÉIS DE MLCC	29
4.1 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSVERSAL REDUZIDA	29
4.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	31
4.3 SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTO AO FOGO	35
5 ADESIVOS E DELAMINAÇÃO EM ALTAS TEMPERATURAS	37
5.1 ADESIVOS.....	37
5.2 DELAMINAÇÃO.....	37
6 PÓS QUEIMA	40
7 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

A madeira é utilizada desde o prelúdio da humanidade, acompanhando suas várias etapas de evolução. Devido as suas propriedades físicas e mecânicas, a madeira apresenta uma grande variabilidade de uso, desde a utilização para criação de utensílios, passando pela geração de energia, até seu uso como material para construção de complexas edificações.

A madeira na construção civil é um dos poucos materiais existentes nessa área que possui um grande potencial para minimizar o impacto desse setor no meio ambiente, visto que “florestas plantadas” auxiliam a retirada de carbono da atmosfera, contribuindo para a redução do efeito estufa (DEMARZO; PORTO, 2007). Portanto, a conscientização ambiental e a introdução de conceitos de sustentabilidade na construção civil têm incentivado a utilização de madeira plantada como fonte renovável. Segundo Passarelli (2013), quando o manejo florestal é realizado com técnicas apropriadas, é possível explorar o recurso madeireiro por tempo indeterminado.

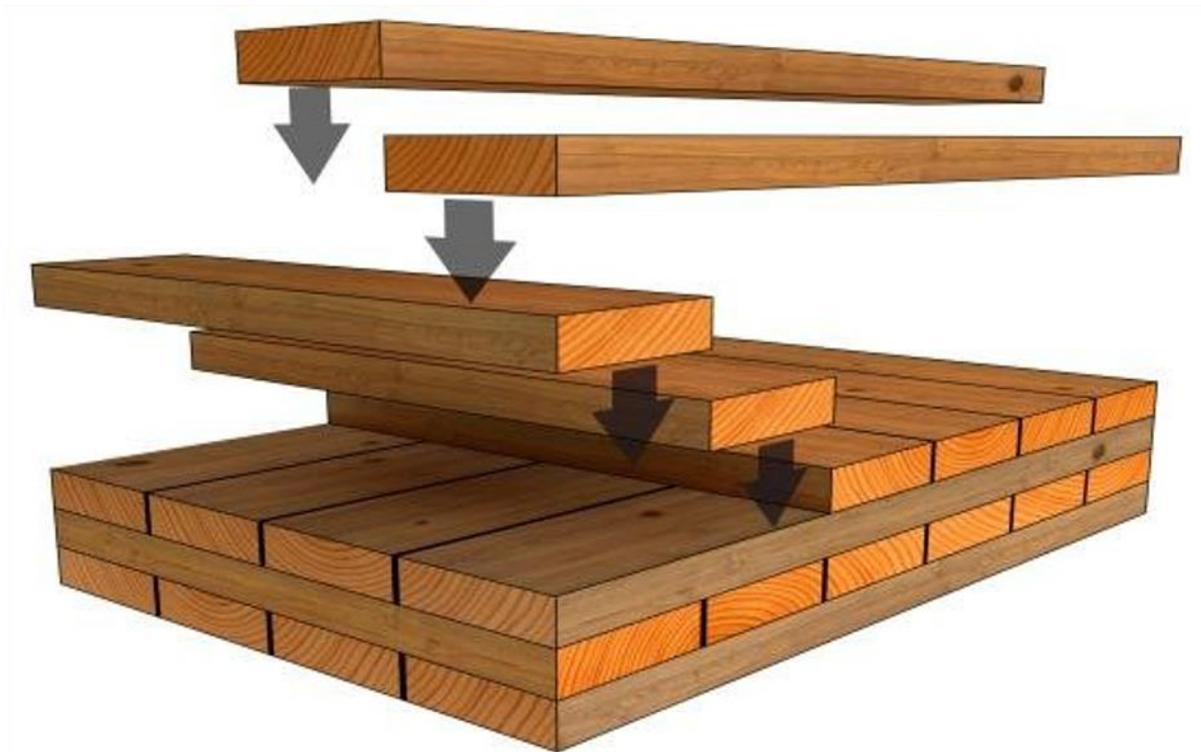
Segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais, a área de floresta do Brasil equivale a 58,5% do seu território, sendo que 98% correspondem a florestas naturais enquanto apenas 2% são florestas plantadas. Sendo assim, o país possui um grande espaço territorial para ser explorado pela indústria da madeira plantada. O aprimoramento técnico e incentivos econômicos poderiam potencializar o emprego desse material na construção civil e, assim, aumentar a oferta de matéria-prima reduzindo o preço dos produtos derivados da madeira e com custo atrativo economicamente para o setor da construção civil (FELIX, 2020).

Nesse sentido, a madeira engenheirada¹ surge como uma nova tecnologia construtiva que é inovadora, pré-fabricada e sustentável. Dentre elas, se destaca a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), um material compósito, fabricado com madeira plantada, tais como pinus e eucalipto e que vem sendo usado para construção de edifícios, visto que é apontado como um produto sustentável e pertinente para a substituição do aço e concreto armado (STÜRZENBECHER *et al.*, 2010). A MLCC consiste em um compósito formado por um arranjo ortogonal das camadas (ver figura 1) de tábuas de madeira maciça (lamelas) dispostas lateralmente entre si, onde as camadas são unidas por meio de adesivos químicos específicos para uso estrutural, o que gera uma rigidez semelhante às placas de concreto armado. O sistema

¹ Segundo Nakamura (2021), o termo madeira engenheirada refere-se a uma série de produtos fabricados a partir de pinus ou eucalipto que são submetidos a tratamentos e processos de engenharia que agregam qualidade e homogeneidade. Entre eles, destacam-se a madeira lamelada colada (MLC) e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC).

construtivo utiliza os painéis de MLCC como elemento estrutural principal, tanto para lajes como para paredes, e as conexões entre estes componentes são realizadas principalmente por cantoneiras metálicas ou por parafusos autoatarraxantes, desenvolvidos para este tipo de aplicação. Este sistema é muito bem desenvolvido e aceito no mercado da América do Norte e no Europeu, com construções de prédios com multipavimentos, como por exemplo o projeto *Dalston Works* de dez andares da empresa *Waugh Thistleton Architects*, em Londres, concluído em 2017, montado inteiramente de painéis MLCC, apresentado na figura 2.

Figura 1 - Composição estrutural da madeira lamelada colada cruzada.



Fonte: Centro de tecnologia da de edificações, 2020

Figura 2 - *Dalston Works*

Fonte: Walsh, 2018

Além disso, esse tipo de tecnologia pode contribuir para a diminuição do déficit habitacional, visto que possibilita a redução de custo e aumenta a agilidade na construção. No entanto, o problema não se caracteriza apenas como uma questão quantitativa, mas também, qualitativa, pois é fundamental que as moradias produzidas passem por um rigoroso controle de qualidade durante o projeto e a construção, visando minimizar as ocorrências de defeitos, manifestações patológicas e desempenho (PASSARELLI, 2013).

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil, segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), foi responsável por 38% do total das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia em 2019. Devido a isso, a procura de materiais sustentáveis e renováveis tornou-se um dos principais objetivos desse setor. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) é um material ecológico e inovador que pode atender a essa demanda devido às suas excelentes propriedades, incluindo resistência ao fogo², sísmica, isolamento natural, entre outras (LE *et al.*, 2020).

Contudo, diversos fatores como a qualidade e a insegurança da MLCC como principal material estrutural para construção civil, dificultam o crescimento e o emprego de sistemas construtivos com esse tipo de tecnologia no Brasil. Isso também ocorre por falta de investimento em sistemas construtivos racionalizados e expressivos, além de conhecimento técnico através de pesquisa em universidades à nível nacional. Ademais, podemos destacar que a percepção negativa que a sociedade brasileira tem em relação à segurança contra incêndio em edifícios construídos com essa tecnologia é um dos principais fatores que limita o uso da MLCC na construção civil no Brasil.

A madeira, por ser um material combustível, conduz a população à falsa conclusão³ de que permite um crescimento rápido do fogo, entrando rapidamente em colapso e prejudicando a segurança estrutural do sistema. Por isso, é crucial associar a necessidade de mais pesquisas voltadas para o tema de resistência ao fogo da madeira lamelada colada cruzada e difundir essa informação amplamente, para provar que são tecnicamente viáveis (PINTO, 2001).

Quando submetida ao fogo, a madeira tem carbonização periférica 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 mesmo após ter sido exposto a altas temperaturas⁴ (PINTO, 2001).

Internacionalmente, o uso da MLCC está crescendo rapidamente, embora a pesquisa sobre a resistência ao fogo da madeira lamelada colada cruzada seja um tópico de pesquisa

² Apesar do autor afirmar que uma excelente propriedade da madeira seria a resistência ao fogo, ainda há muito o que se pesquisar sobre este assunto.

³ Salienta-se que a conclusão da população pode ser verdadeira se a estrutura não for corretamente dimensionada e adequadamente protegida.

⁴ Embora o autor seja otimista quanto à resistência da madeira em situação de incêndio, é importante ressaltar que o comportamento de estruturas de madeira para utilização em edifícios altos ainda precisa ser estudado.

ainda em andamento. Porém, apesar dos avanços das publicações científicas no Brasil sobre o tema, o crescimento do mercado e a atualização da Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022) - que se refere à diretrizes para projetos de estruturas de madeira - ainda existe um enorme vácuo de conhecimento não explorado sobre MLCC no Brasil, principalmente no que diz respeito à segurança contra incêndio. É necessário, portanto, aprofundar mais o conhecimento sobre diversos assuntos dentro desse tema, como a verificação de métodos de dimensionamento e a criação de métodos numéricos que levem em conta as condições da MLCC no Brasil, além da validação dos produtos que se encontram disponíveis.

Ademais, os painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) estão sendo amplamente utilizados como paredes com função estrutural ou como paredes divisórias, sem função estrutural. Logo, em caso de incêndio, isso significa que, durante toda a duração da queima, os elementos de parede MLCC devem manter uma capacidade de carga suficiente para a manutenção do equilíbrio da estrutura, a fim de evitar o colapso e possibilitar a evacuação e o combate ao incêndio.

Quando exposta a altas temperaturas, a resistência e a rigidez da zona termicamente afetada diminuem gradualmente até que uma camada carbonizada seja formada, diminuindo a capacidade de carga das paredes de MLCC, ou seja, reduzindo a transmissão de força vertical, o que por sua vez, pode levar ao colapso da estrutura. Por isso, torna-se extremamente necessário investigar o comportamento das paredes de MLCC em exposição a altas temperaturas.

Nesse sentido, este trabalho de conclusão propõe-se a produzir um referencial teórico sobre a problemática do comportamento de paredes de MLCC em situação de incêndio no âmbito nacional e internacional. Essa compreensão do estado do conhecimento sobre este tema, que resulta do referencial teórico, é necessária no processo de evolução da ciência, afim de que se ordene periodicamente o conjunto dessas informações e resultados já obtidos, visando compilar informações e identificar possíveis nichos com o objetivo de nortear os pesquisadores que virão a se interessar pelo tema.

1.2 OBJETIVO

A compreensão atual da resposta termomecânica de paredes de madeira lamelada colada cruzada é insuficientemente desenvolvida nacional e internacionalmente. Tendo isso em vista, a proposta deste trabalho é produzir um referencial teórico abordando o tema resistência ao fogo de paredes de painéis de MLCC.

Logo, o objetivo deste referencial teórico é compilar informações e identificar possíveis nichos com o propósito de nortear os pesquisadores que virão a se interessar pelo tema em questão, tentando responder que aspectos e dimensões vêm sendo destacados e privilegiados em diferentes lugares.

1.3 METODOLOGIA

Foi definido como método de pesquisa a realização de um referencial teórico sobre painéis parede de MLCC em situação de incêndio, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática. Esta possui como principal finalidade mapear, coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar a produção acadêmica em uma área da ciência, resultando no balanço do conhecimento já elaborado e apresentando os enfoques, os assuntos mais abordados e as lacunas existentes.

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. Deste modo, utilizando como critério a interpretação do autor de quais são as plataformas - provedoras de bases de dados de pesquisa, revistas eletrônicas, e-books e serviço de descoberta para bibliotecas - mais relevantes na atualidade, foram selecionadas as cinco instituições abaixo:

- EBSCO host;
- Google acadêmico nacional;
- Google acadêmico internacional;
- Science Direct;
- Acervo periódico CAPES⁵.

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?;

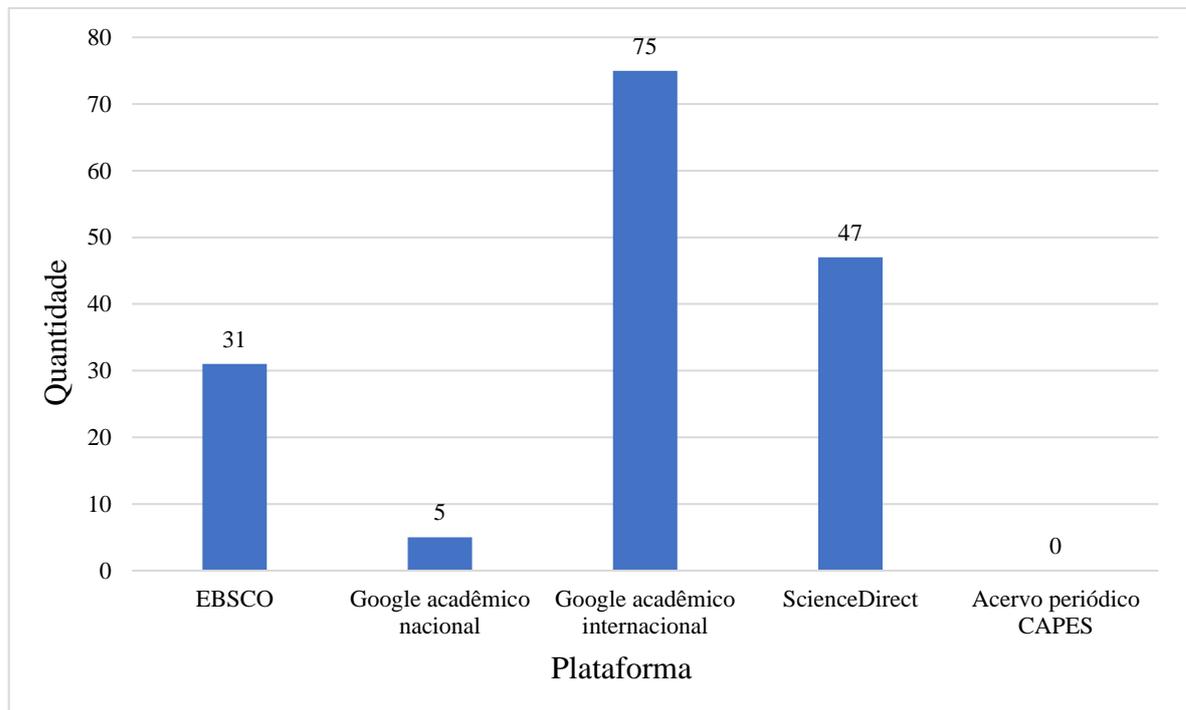
⁵ A busca foi realizada no site do acervo da CAPES sem definir uma base de dados, tendo como objetivo encontrar somente artigos nacionais. No entanto, foi realizado uma busca diretamente na plataforma Sciencedirect (um dos bancos de dados do acervo) afim de buscar somente artigos internacionais. Devido a isso, as duas plataformas estão contabilizadas separadas.

- Descritores: madeira laminada cruzada fogo / *Cross laminated timber fire* / madeira laminada cruzada segurança contra incêndio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Após a busca nas plataformas mencionadas no item anterior, foram selecionados 87 artigos para serem avaliados. A figura 3 apresenta a quantidade de artigos encontrados por plataforma. Nas tabelas de 1 a 7, são apresentados os resultados obtidos através das pesquisas, listando a plataforma, a data de pesquisa, a palavra chave, os filtros, a quantidade de artigos selecionados e quais artigos não foram escolhidos ou não houve permissão de acesso.

Figura 3 - Artigos encontrados por plataforma



Fonte: Autor

Tabela 1 - Plataforma EBSCO host

Data da pesquisa	30/05/2022
Palavra chave	<i>Cross laminated timber fire</i>
Filtros	Todas as bases / Sem limitação de texto
Número de artigos selecionados	31

Fonte: Autor

Tabela 2 - Plataforma ScienceDirect

Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	<i>Cross laminated timber fire</i>
Filtros	<i>keywords: Cross laminated timber fire</i>
Número de artigos selecionados	47

Fonte: Autor

Tabela 3 - Plataforma Google Acadêmico 1

Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	Madeira laminada cruzada <u>incêndio</u>
Filtros	-
Número de artigos selecionados	5

Fonte: Autor

Tabela 4 - Plataforma Google Acadêmico 2

Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	Madeira laminada cruzada <u>fogo</u>
Filtros	-
Número de artigos selecionados	5

Fonte: Autor

Tabela 5 - Plataforma Google Acadêmico 3

Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	<i>Cross laminated timber fire</i>
Filtros	Frase exata (<i>Cross laminated timber</i>) / pesquisa no título / sem incluir citações
Número de artigos selecionados	75

Fonte: Autor

Tabela 6 - Plataforma Acervo periódico Capes 1

Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	Madeira laminada cruzada <u>incêndio</u>
Filtros	-
Número de artigos selecionados	0

Fonte: Autor

Tabela 7 - Plataforma Acervo periódico Capes 2

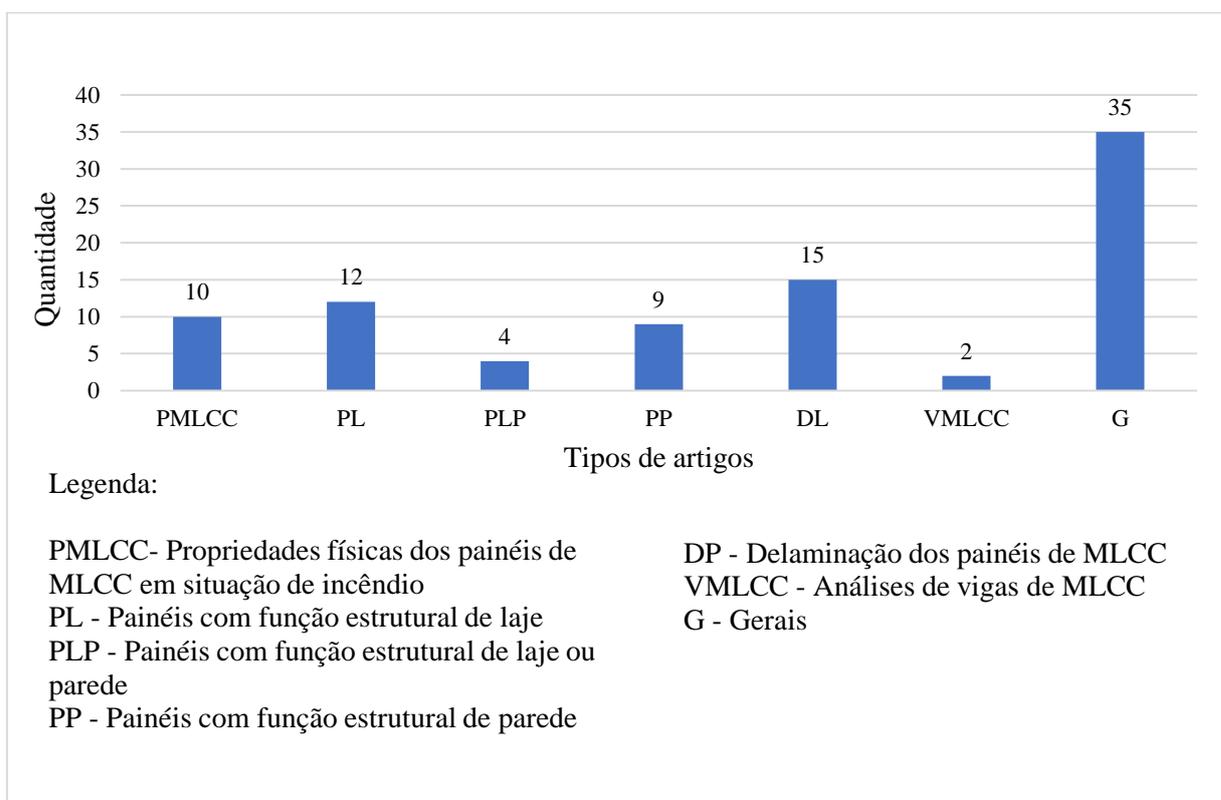
Data da pesquisa	31/05/2022
Palavra chave	Madeira laminada cruzada <u>fogo</u>
Filtros	-
Número de artigos selecionados	0

Fonte: Autor

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 na figura 4 (conforme as legendas especificadas abaixo).

- Propriedades físicas dos painéis de MLCC em situação de incêndio;
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de laje;
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de laje ou parede;
- Análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de parede;
- Análises sobre delaminação dos painéis de MLCC;
- Análises de vigas de MLCC;
- 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), que não se classificaram em nenhum dos anteriores.

Figura 4 - Quantidade de artigos por classificação



Fonte: Autor

Tendo em vista que o objetivo desse trabalho é apresentar um referencial teórico sobre tema resistência ao fogo de paredes de painéis de madeira lamelada colada cruzada, foram selecionados, a partir desta metodologia, nove artigos tipificados como análises experimentais e teóricas de painéis com função estrutural de parede. Para a leitura crítica sobre estes artigos, foi utilizado o método *Skimming*⁶, onde o artigo foi lido de uma forma superficial apenas para ter uma compreensão geral do texto. Em seguida foi utilizado o método *Scanning*⁷, no qual o objetivo principal era obter as informações dos resultados e conclusões do artigo.

Os 9 artigos selecionados são de diversos países do mundo. Os assuntos específicos abordados por eles são extremamente necessários para a compressão do comportamento de paredes de MLCC expostas ao fogo. Dentre os principais temas apresentados, encontra-se a realização de experiências físicas com o objetivo de validar parâmetros especificados em norma, como taxa de carbonização e camada de resistência zero - assuntos que serão abordados

⁶ Segundo Höfling (2012), “a estratégia de leitura chamada *Skimming* é um tipo de leitura que busca o maior número possível de informações ao primeiro contato com um texto. É um “passar de olhos” pelo texto para identificar sua ideia geral, tema central”.

⁷ *Scanning* é uma complementação *Skimming*. Segundo Höfling (2012), “é um tipo de leitura (mais detalhada e atenta) que faz com que o leitor obtenha informações específicas dentro do texto. Um tipo mais aprofundado de leitura que varia de acordo com os objetivos do leitor”.

nos capítulos seguintes. Também, em alguns deles, verifica-se que há preocupação com a criação de modelos computacionais para simulação de propriedades mecânicas de paredes de MLCC em situação de incêndio. Na tabela 8, encontra-se o nome destes artigos, o ano em que ocorreu cada publicação e qual a sua principal conclusão

Tabela 8 - Artigos selecionados para o referencial teórico

Nome	Ano	Principal conclusão
<i>Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions;</i>	2015	Método da seção transversal reduzida é inadequado para prever a duração da resistência ao fogo de paredes de MLCC em testes de curva de fogo padrão
<i>Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber panels;</i>	2017	A integridade das paredes de MLCC foi preservada durante todo o período do teste de fogo, ou seja, 60 minutos
<i>Structural response of cross-laminated timber compression elements exposed to fire;</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;</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;</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;</i>	2020	A taxa média de carbonização calculada para painéis 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;</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;</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.</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: Autor

Através de uma análise sobre a localização da produção destes artigos (figura 5), é possível observar que as pesquisas sobre paredes de MLCC expostas ao fogo concentram-se na região europeia, comprovando que a Europa é o polo dessa tecnologia. Seus estudos focam principalmente em testes 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 é criar métodos numéricos e modelos de simulação para prever a capacidade de carga residual das paredes de MLCC.

Figura 5 - Mapa da localização dos artigos utilizados neste referencial teórico



Fonte: Autor

Os capítulos 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 nestas e qual é o efeito da decomposição do fogo e da fase de resfriamento na capacidade de carga de elementos estruturais de MLCC.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE AS PAREDES DE MLCC

Atualmente, no mundo, os produtos de MLCC estão experimentando um aumento na popularidade e na sua utilização como elementos estruturais para empreendimentos comerciais e residenciais. Os painéis estão sendo usados inclusive em projetos de edifícios altos em lugares que possuem técnicas e conhecimentos avançados na área, além de locais nos quais haja legislação que permita este tipo de construção.

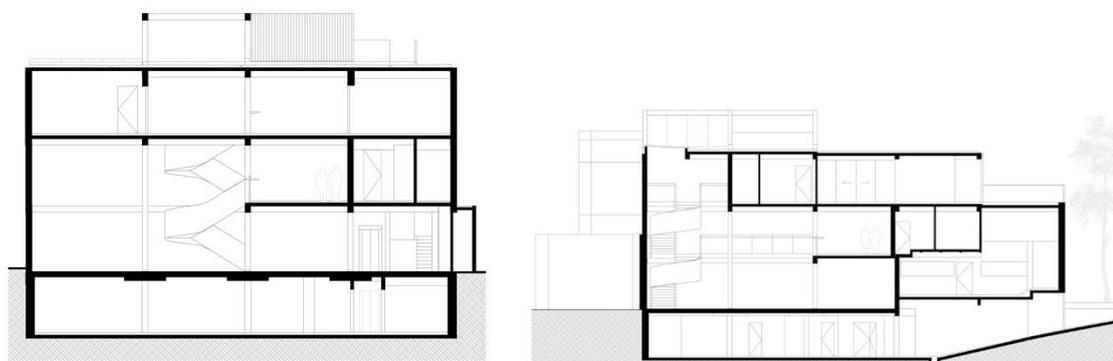
À medida que as alturas dos edifícios de madeira aumentam, as demandas estruturais nos membros de compressão vertical tornam-se mais críticas devido aos efeitos da gravidade e do carregamento do vento. Também, a pegada de carbono⁸ em um edifício alto é significativamente maior do que em prédios baixos. Essas duas situações oferecem a oportunidade de usar madeira de reflorestamento em estruturas, sequestrando, assim, mais carbono da atmosfera e, portanto, permitindo projetos de construção mais sustentáveis (SKIDMORE *et al.*, 2013). No entanto, a madeira é um material combustível e a sua aplicação para estruturas em edifícios médio e alto levanta preocupações quanto ao projeto para garantir a segurança adequada contra incêndios.

3.1 CENÁRIO NACIONAL

No Brasil, a MLCC está começando a ser utilizada comercialmente, existindo apenas duas empresas que desenvolvem produtos de engenharia em madeira colada cruzada. Essa situação não é muito diferente na pesquisa acadêmica, onde ainda estão começando a explorar análises de desempenho e comportamento da MLCC. Segundo Felix (2020), atualmente no Brasil, o sistema de construção com MLCC tem sido usado, principalmente, para construção de edifícios de alto padrão até dois pavimentos. Porém, recentemente, foi construído em São Paulo, o primeiro edifício em altura com MLCC no Brasil. O projeto possui 4 pavimentos (ver figura 6) e foi desenvolvido pelo escritório de arquitetura Matheus Farah e Manoel Maia. Ademais, pode-se concluir que o país vem ganhando investimentos para produzir prédios médios e altos com MLCC.

⁸ A pegada de carbono é definida como a soma da quantidade de gases de efeito estufa que é liberada em uma atividade industrial.

Figura 6 - Loja Dengo



Fonte: Blog Amata Brasil, 2020

Contudo, o Brasil carece de pesquisa relacionada ao comportamento estrutural de MLCC em edifícios médio e altos, submetidos a uma situação de incêndio. Na procura de artigos realizada sobre o tema tratado por este trabalho, foi encontrado apenas duas publicações que focavam no assunto segurança contra incêndio em painéis de MLCC: “Análise da durabilidade da reação ao fogo da madeira e painéis derivados de Madeira”, da autora Lídia Ana Araújo de França, do ano 2019, que possuía o objetivo de analisar a durabilidade da reação ao fogo da madeira lamelada colada (MLC⁹) e madeira lamelada colada cruzada (MLCC), como

⁹ MLC é um material estrutural fabricado através da união de segmentos individuais de madeira colados com adesivos industriais.

representantes de madeira sólida, e do painel de *Oriented Strand Board* (OSB¹⁰); “Parâmetros de projeto para segurança contra o incêndio do sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* (CLT)”, da autora Patrícia Meira de A. C. Felix, do ano 2020, que possuía o objetivo de compreender o comportamento da MLCC e dos componentes do sistema construtivo expostos ao fogo, a fim de propor parâmetros para projeto de segurança contra incêndio. Não foi encontrado nenhum artigo que possuísse como foco o tema comportamento de paredes de MLCC expostas ao fogo.

Entretanto, a indústria da construção no Brasil começa a mostrar preocupação por esse assunto. A NBR 7190 (ABNT, 2022), que regulamenta construções feitas em madeira, foi publicada em 29 de junho de 2022 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Ela introduz parâmetros para cálculos de estruturas em MLCC (Madeira lamelada colada cruzada) e Glulam (*Glued Laminated Timber*, ou madeira lamelada colada), dimensionamento em situação de incêndio e diretrizes para o controle de qualidade industrial. A última versão da norma era de 1997 e não possuía orientação para estrutura de madeira em situação de incêndio. A NBR 7190 de 2022, que recebe o título principal de “Projeto de estruturas de madeira”, se divide nas 7 partes listadas abaixo:

- Parte 1: Critérios de dimensionamento;
- Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeiras;
- Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas;
- Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais;
- Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com caracteres mecânicos;
- Parte 6: Métodos de ensaios para caracterização de MLC estrutural;
- Parte 7: Métodos de ensaios para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural.

A parte 1 da NBR 7190 (ABNT, 2022), no capítulo “11 Estruturas de madeira em situação de incêndio”, apresenta diretrizes para critérios de dimensionamento, onde a segurança estrutural de madeira engenheirada em situação de incêndio seja necessária, em edifícios destinados à habitação, a uso comercial, industrial e a edifícios públicos. Ela tem como

¹⁰ OSB é uma placa composta por lascas de madeira de reflorestamento organizadas na mesma direção.

princípio teórico que a estrutura de madeira exposta ao fogo, manterá seu núcleo da seção fria a apenas uma pequena distância da zona queimada, conservando grande parte das propriedades físicas e mecânicas da madeira, ou seja, manterá sua capacidade resistente para o tempo que ela for dimensionada. Portanto, a norma entende que é preciso dimensionar a estrutura em situação de incêndio para que esta tenha capacidade de resistência em altas temperatura, ao afirmar que:

“Entende-se por dimensionamento em situação de incêndio, a verificação dos elementos estruturais e suas conexões, com ou sem revestimento contra fogo, no que se refere à capacidade resistente em temperatura, a fim de evitar o colapso da estrutura em condições que prejudiquem a fuga dos usuários da edificação e, quando necessário, a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para ações de combate ao fogo.”

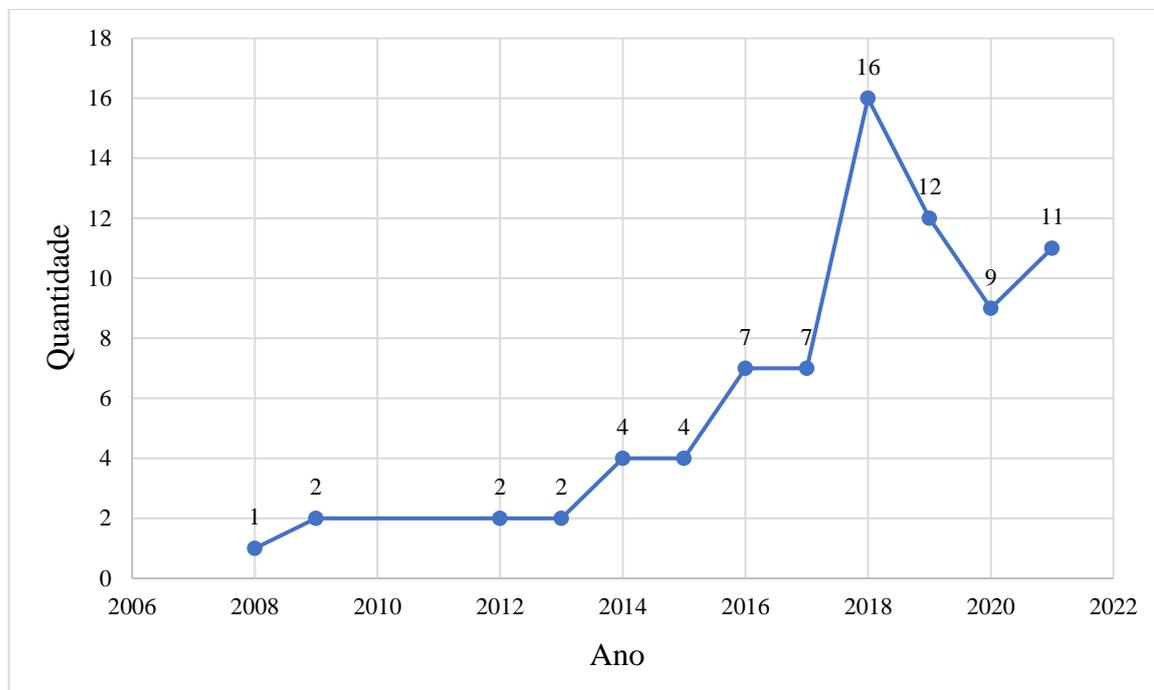
O método que a norma apresenta para verificação da capacidade resistente de estruturas de madeira em situação de incêndio é o método de seção reduzida ou, como a norma prefere referir-se, método simplificado. Este, consiste em calcular qual será a redução da seção transversal devido a carbonização da madeira e assim, portanto, ir em direção de um resultado que aumente a seção envolvida (espessura/número de camada). A norma também determina que essa metodologia deve ser utilizada para o dimensionamento de painéis de MLCC. Porém, Schmid *et al.* (2015^a), descobriram que o método da seção transversal reduzida (método simplificado), que atualmente também é recomendado para calcular a capacidade de carga da madeira nas normas Europeias, era inadequado para prever a duração da resistência ao fogo de paredes de MLCC. Portanto, verifica-se que ainda é preciso avançar muito em pesquisa e normatização no dimensionamento de elementos estruturais de paredes de MLCC no Brasil.

3.2 CENÁRIO INTERNACIONAL

Já no cenário internacional, principalmente Europa e América do Norte, na última década, tem se observado que a MLCC é a opção mais empregada entre as novas soluções estruturais em madeira para construções de porte médio a alto (a partir de 5 pavimentos) (FELIX, 2020). Sendo a madeira um material combustível, os pesquisadores internacionais estão focando suas pesquisas em segurança estrutural de incêndio nesse tipo de construção, principalmente em estudar o comportamento de paredes de MLCC, pois são elementos fundamentais para a estabilidade de uma estrutura em situação de incêndio. Nesse sentido, através de uma análise de linha de tendência exponencial do ano de publicação dos 83 artigos

internacionais selecionados (5 dos 87 eram artigos nacionais), é possível verificar que o número de publicações aumentou em média 10 vezes de 2008 até 2021, conforme mostra a figura 7.

Figura 7 - Publicações internacionais de artigos sobre MLCC em situação de incêndio



Fonte: Autor

Para Wiesner *et al.* (2017), construir uma abordagem de engenharia de incêndio estrutural racional e baseada em conhecimento em painéis de MLCC é um obstáculo fundamental para o avanço do setor de construção em madeira projetada, particularmente para edifícios de vários andares.

Em Bai (2021^b) é descrito que a crescente demanda por edifícios altos de madeira, aumenta a importância dos elementos de compressão vertical (por exemplo, paredes) que suportam a carga de peso e a carga de vento no sistema estrutural. Portanto, devido à combustibilidade da madeira, a segurança estrutural contra incêndio deste material é considerada essencial para sua aplicação em edifícios altos.

Por fim, segundo Wiesner *et al.* (2022), os pilares de madeira lamelada colada são usados em edifícios baixos e médios há décadas, e seu comportamento como elementos de compressão expostos ao fogo já foi investigado anteriormente. No entanto, as paredes de MLCC receberam pouca atenção, resultando em uma escassez de dados sobre o seu comportamento estrutural ao fogo. Isto resultou em uma compreensão limitada do comportamento estrutural da madeira, sendo necessário aprofundar mais o assunto.

4 RESISTÊNCIA DE PAREDES DE PAINÉIS DE MLCC

A resistência ao fogo de madeira lamelada colada (MLC), avaliada por testes de temperatura padrão em fornos, tem sido estudada desde o início do século XX. Já em 1967, Malhotra & Rogowski propuseram um modelo empírico para prever a resistência ao fogo de colunas de madeira lamelada colada.

Esse método de cálculo foi baseado em testes de fogo padrão em escala real. Com isso, o modelo construído pode 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 foram multiplicados em série, para estender seus dados e prever empiricamente a resistência ao fogo. 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 madeiras com propriedades mecânicas variadas e com lamelas na posição vertical (WIESNER *et al.*, 2017).

4.1 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 9170 (ABNT, 2022) e EN 1995-1-2 (EUROPEAN STANDARDS, 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 expostas ao fogo que atuará como isolante térmico (ver figura 8). Desse modo, 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.

No método STR, presume-se que a madeira carboniza a uma taxa nominal durante a exposição ao fogo em condições padrão de incêndio, definida como 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 (ver figura 9, camada de resistência zero) é especificada normalmente em norma como sendo 7 mm e isso reduz ainda mais o tamanho da seção transversal efetiva. Por conseguinte, esta é então usada para prever a

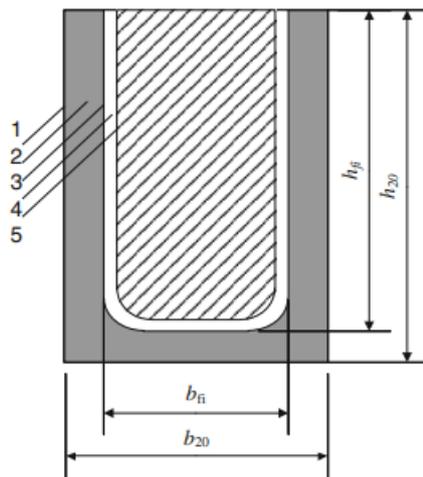
capacidade de carga restante em incêndio, assumindo que a seção transversal reduzida mantém suas propriedades mecânicas iguais a temperatura ambiente (WIESNER *et al.*, 2017).

Figura 8 - Seção carbonizada



Fonte: Alan Dias

Figura 9 - Noções básicas do método de seção transversal reduzida



Legenda:

- 1 Seção transversal original
- 2 Camada carbonizada
- 3 Seção transversal residual
- 4 Camada de resistência zero
- 5 Seção transversal efetiva
- b_{r1} Largura da seção transversal residual
- b_{20} Largura da seção transversal original
- h_{r1} Altura da seção transversal residual
- h_{20} Altura da seção transversal original

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

4.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Segundo Schmid *et al.* (2015^a), o método da seção transversal reduzida foi originalmente proposto por Schaffer para estruturas de madeira lamelada colada submetido à flexão. Contudo, esse método não pode ser aplicado para paredes de MLCC, pois em experimentos anteriores de Suzuki *et al.* (2016), descobriram que a flambagem global foi o modo de falha dominante para este tipo de estrutura em testes 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 a flambagem é governada por rigidez, o método não é diretamente aplicável a este tipo de fenômeno. Ademais, o método da seção transversal reduzida em geral pode não ser aplicável para MLCC uma vez que, o acúmulo do material é não homogêneo e a camada de resistência zero constante, dada na EN 1995-1-2 (EUROPEAN STANDARDS, 2004), pode avançar sobre as laminações dispostas paralelamente e perpendicularmente à seção transversal, que possuem propriedades de resistência e rigidez diferentes na direção de suporte da carga do painel (Schmid *et al.*, 2015^a).

Não obstante, Schmid *et al.* (2010^b) apresentam um modelo de projeto simples, baseado no método de seção transversal eficaz, para projetos estruturais contra incêndio de painéis de MLCC em flexão. No entanto, este modelo não é imediatamente aplicável aos painéis de parede, pois neste tipo de estrutura a falha acontece devido a flambagem, ou seja, pela instabilidade estrutural, ao contrário do que ocorre em painéis de laje ou vigas de MLCC - elementos do estudo do modelo apresentado em Schmid *et al.* (2010^b) -, onde a falha acontece por flexão (Schmid *et al.*, 2015^a).

A norma EN 1995-1-2 (EUROPEAN STANDARDS, 2004) sugere o método da seção transversal reduzida para madeiras. Porém, como visto, ele não é muito adequado para o dimensionamento de painéis de MLCC. Pensando nisso, a norma fornece um 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 os painéis sob carregamento à curva de fogo padrão ISO 834 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1999). Logo, ensaios de média e larga escala foram realizados para elementos protegidos e desprotegidos sujeitos a diferentes níveis de carga, bem como

ensaios de referências, em temperatura ambiente, destrutivos e não destrutivos (por exemplo, medição de rigidez e testes de flambagem) para investigar o comportamento e as propriedades físicas dos painéis parede de MLCC.

Em relação às paredes de MLCC com proteção (placas de madeira e placas de gesso cartonado tipo F), Schmid *et al.* (2015^a), concluem que houve um comportamento térmico semelhante da proteção contra incêndio em placas de gesso acartonado e placas de fibra com a mesma profundidade teórica usada 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 (EUROPEAN STANDARDS, 2004). Também mostram que resultados dos cálculos avançados para a camada de resistência zero e profundidades residual se aproximaram dos resultados experimentais.

Em Suzuki *et al.* (2016), foram realizados testes de resistência ao fogo com paredes de MLCC para estudar o comportamento da taxa de carbonização e da resistência ao fogo. Os resultados revelaram que para as paredes submetidas à exposição unilateral ao fogo, a carbonização assimétrica alterou gradualmente o modo de compressão axial para compressão excêntrica.

A profundidade da camada de resistência zero de 7 mm, atualmente sugerida na EN 1995-1-2 (EUROPEAN STANDARDS, 2004), é baseada em um número relativamente pequeno de testes em fornos padrão, realizados na década de 1980, que possuíam como corpos de prova, vigas de madeira lamelada colada submetidas a flexão. Porém, a aplicabilidade do valor da CRZ para MLCC é duvidoso (WIESNER *et al.*, 2017).

Em uma série de testes realizado por Schmid *et al.* (2015^b), que possuíam como objetivo utilizar as informações extraídas (carga máxima, área de seção transversal residual, etc) para calcular e determinar a camada de resistência zero, verificou-se que os valores reais das resistências foram sempre superiores aos valores característicos associados ao grau específico de madeira, o que significa que o uso desses parâmetros resultaria em valores inferiores e não conservadores para camada de resistência zero, o que torna estes valores 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) terminaram ressaltando que a determinação da camada de resistência zero com base em experimentos descritos no artigo mostra um desvio significativo dos valores atuais expressados na EN 1995-1-2 (EUROPEAN STANDARDS, 2004), e recomendam que o STR seja revisto, com base em resultados experimentais, bem como

em cálculos avançados proposto por Schmid *et al.* (2013).

A partir de uma série de testes de forno em elementos MLCC de flexão, Schmid *et al.* (2010^b) sugeriram que a camada de resistência zero de 7 mm para MLCC, deve ser substituído por uma fórmula onde a profundidade da CRZ varia de acordo com a profundidade total da seção transversal restante. Para verificar a validade da formulação, Goia (2010) usou cálculos e resultados experimentais, nos quais mostraram que essa abordagem resulta em valores conservativos de resistência ao fogo para paredes de MLCC comprimidas em testes de forno padrão. Além disso, em Schmid *et al.* (2015^b) foi mostrado que a CRZ de 7 mm usada em projetos, deve variar para cada tipo de carregamento (flexão, compressão ou tração). Por exemplo, para um painel de MCLL submetido a flexão em situação de incêndio, a CRZ deve ser um valor entre 12,5 e 18,9 mm com média de 14,8 mm (WIESNER *et al.*, 2017).

Em Wiesner *et al.* (2017), oito paredes de MLCC (de 3 camadas e de 5 camadas) foram testadas para estudar suas respostas estruturais ao fogo enquanto estão submetidas a uma carga de compressão concêntrica constante equivalente a 10% ou 20% de sua capacidade ambiente teórica (usando propriedades mecânicas nominais). As respostas de deflexão das paredes e seus tempos de falha foram comparados com as previsões feitas usando uma abordagem de análise STR. Os autores verificaram que os tempos de falha calculados para os quatro testes, quando baseado em uma taxa de carbonização de 0,65 mm/min e uma CRZ de 7 mm, não são conservadores, o que corrobora com os resultados relatados anteriormente. Para os autores, o conceito CRZ atual é uma aproximação pouco eficiente para se aplicar em materiais complexos, como a MLCC exposto ao fogo. O método deve ser descartado e substituído por um mais avançado, principalmente quando elementos estruturais de MLCC são aplicados em edifícios de múltiplos pavimentos.

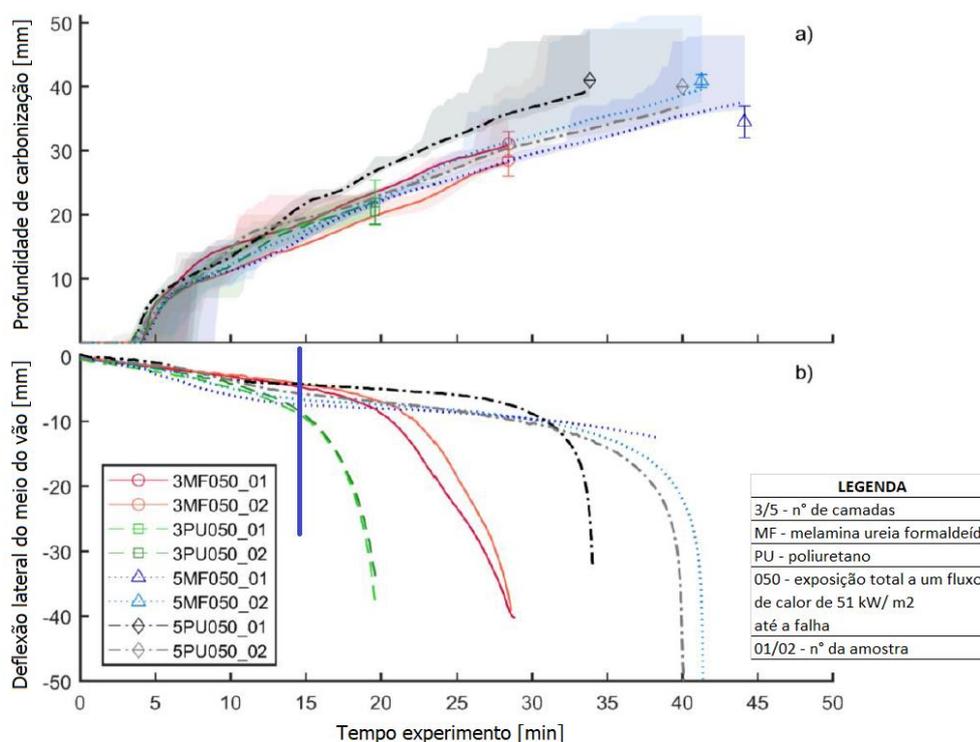
Outra importante descoberta de Wiesner *et al.* (2017), é que a falha das paredes foi dominada por momentos secundários e efeitos de instabilidade ligados às reduções na rigidez de flexão, em vez da perda de resistência do material. É recomendado, portanto, que esta área receba mais atenção, devendo ser consideradas as várias condições de contorno térmicas e estruturais. Por último, também relataram que as paredes de MLCC com três camadas (33–34–33 (mm)), falharam mais cedo do que aquelas com cinco camadas (20–20–20–20–20 (mm)), pois as camadas externas mais espessas na MLCC de três níveis, que eram responsáveis por uma proporção maior da capacidade total de carga, foram danificadas mais cedo por temperaturas elevadas, levando ao colapso do painel.

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) verificam que paredes de três camadas (40–20–40 mm) falharam significativamente mais cedo do que aquelas com cinco camadas (20–20–20–20–20 mm), 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 é 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), demonstram que as paredes falharam devido à instabilidade global. Conforme se observa na figura 10, 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, a partir da linha azul, apresenta esse comportamento). Mais pesquisas são recomendadas para uma melhor compreensão das perdas de rigidez à compressão e histórias de deflexão para o projeto estrutural de incêndio de MLCC e outros sistemas de madeira maciça (WIESNER *et al.*, 2022).

Figura 10 - a) Profundidades de carbono e b) Deflexões laterais a meia altura para paredes de MLCC até a falha.



Fonte: Adaptado de Wiesner *et al.*, 2022

4.3 SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTO AO FOGO

Segundo Nassif *et al.*, (2014), a classificação 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 de teste de incêndio credenciadas são muito limitadas. Portanto, torna-se extremamente necessário desenvolver ferramentas numéricas para simular o comportamento de componentes estruturais de MLCC em escala real sob fogo.

Nesse contexto, Thi *et al.* (2018) apresentam uma metodologia numérica para simular a resistência à integridade ao fogo de sistemas de parede à base de madeira em escala real. Sendo assim, desenvolveram e implementaram no software Abaqus, uma sub-rotina chamada UMATHT, dedicada a analisar o comportamento da madeira sob fogo.

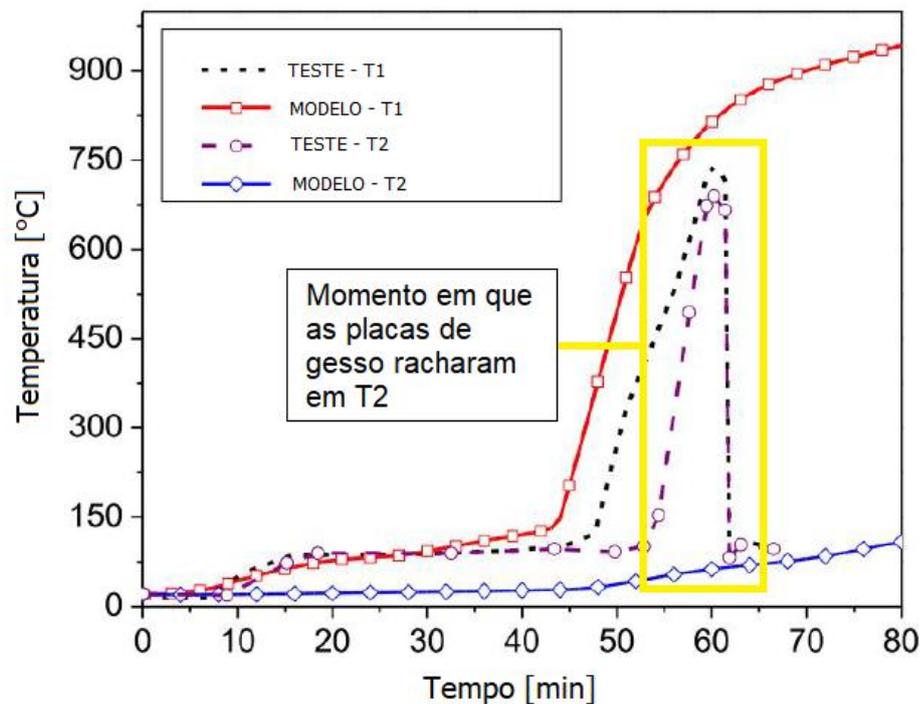
A novidade deste trabalho em relação à literatura existente, que trata do comportamento de estruturas de madeira sob fogo, é que as fontes de energia (endotérmica e exotérmica), envolvidas na pirólise da madeira exposta ao fogo, são explicitamente levadas em consideração na equação do balanço de energia, em vez de propriedades termofísicas gradualmente

modificadas, que é o padrão na literatura. Para tanto, uma sub-rotina de usuário, denominada UMATHT, foi desenvolvida e implementada com sucesso no código de elementos finitos Abaqus para análise térmica (Thi *et al.*, 2018).

A figura 11 mostra o aumento de temperatura previsto numericamente nos termopares T1 e T2 em comparação com as medições experimentais. Até cerca de 48 minutos, é possível observar que as previsões numéricas são razoáveis em comparação com os experimentos. Após esse tempo, o modelo experimental T2 apresenta um rápido aumento das temperaturas. Isso corresponde ao momento em que as placas de gesso racharam e se desintegraram, expondo a lâmina mineral, levando à exposição direta dos termopares ao fogo (Thi *et al.*, 2018).

A conclusão dos autores é de que este modelo numérico desenvolvido ainda precisa de melhorias profundas para que possa ser considerado uma ferramenta robusta para o projeto de incêndio. Por exemplo, as rachaduras e a queda da placa de gesso devem ser explicitamente consideradas no modelo numérico para analisar adequadamente as estruturas. Além disso, o modelo de pirólise desenvolvido precisa de validação mais profunda em diferentes espécies de madeira e montagens.

Figura 11 - Comparação entre aumentos de temperatura previstos numericamente com os registrados experimentalmente nos termopares T1 e T2 para parede de MLCC com face de gesso.



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

5 ADESIVOS E DELAMINAÇÃO EM ALTAS TEMPERATURAS

5.1 ADESIVOS

Um dos principais componentes para os elementos estruturais de MLCC são os adesivos usados para colar 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 madeira colada cruzada quando exposta ao fogo.

Nesse contexto, no trabalho de Wiesner *et al.* (2022), são testadas paredes de MLCC com dois tipos de adesivos, resina de melamina-ureia-formaldeído (MUF) e poliuretano monocomponente (PU). Os resultados mostraram que as amostras coladas com adesivo PU defletiram mais rapidamente e falhavam mais cedo do que aquelas coladas com adesivo MUF. Considerando os tempos de falha para amostras individuais testadas sob exposições de alto fluxo de calor, parece 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 corrobora com alguns estudos anteriores, no qual mostraram que os adesivos de MUF, por serem mais rígidos e reticulados, apresentam desempenho melhor em temperatura elevada do que as formulações de PU. (WIESNER *et al.*, 2022).

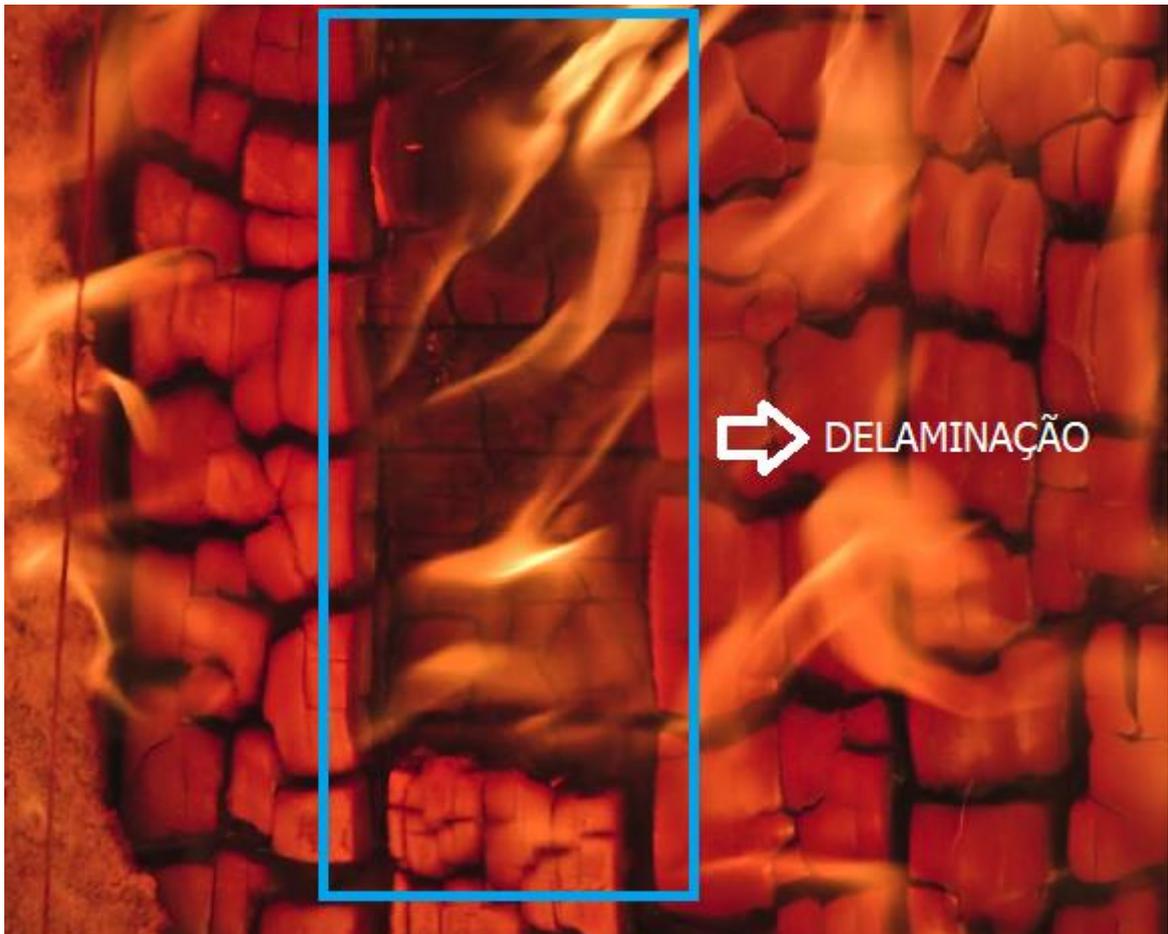
Em testes realizados em paredes de MLCC por Westhuyzen *et al.* (2020), foi observada a formação de vazios entre as lamelas individuais nas camadas de MLCC, sendo visto como uma das principais razões para falha local dos seus painéis. Durante o teste de incêndio, a largura do vão entre as lamelas adjacentes 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 entrem entre as tábuas adjacentes. Por conseguinte, se o adesivo for suficientemente resistente ao calor, isso poderá atrasar a carbonização bidimensional, diminuindo a taxa geral de carbonização do painel de MLCC (WESTHUYZEN *et al.*, 2020).

5.2 DELAMINAÇÃO

A aderência entre lamelas é um fator crítico 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 lamela subjacente, quando expostas 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 reascende o fogo e aumenta a extensão da carbonização (WESTHUYZEN *et al.*, 2020). A figura 12 mostra a região onde ocorreu a delaminação com uma parcela de uma lamela descolada.

Figura 12 - 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 da madeira maciça, visto que as ligações imperfeitas e os vazios entre as camadas aceleram a carbonização. Em um estudo recente sobre taxa de carbonização (TC) em MLCC, Klippel e Schmid (2018) observaram que a MLCC tem comportamento e TC semelhantes às da madeira caso não ocorra delaminação. Porém, caso isso aconteça, a taxa de carbonização aumenta rapidamente (WESTHUYZEN *et al.*, 2020).

Westhuyzen *et al.* (2020) investigaram a resistência ao fogo de painéis de parede de MLCC fabricados localmente, a partir de pinho e eucalipto da África do Sul (espécies de madeira mais comumente usadas para MLCC na África do Sul) coladas com adesivo de

poliuretano. Eles obtiveram como resultado uma taxa média de carbonização dos painéis parede 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 recomendada (entre 0,61 mm/min e 0,68 mm/min). Segundo Westhuyzen *et al.* (2020), essa diferença pode ser devido a diferenças nas propriedades físicas, como, por exemplo, uma madeira de maior densidade sendo usada nas pesquisas internacionais. Não obstante, isso mostra que é necessário que se realizem estudos em paredes de MLCC, que utilizam de madeiras produzidas no Brasil, afim de verificar essas possíveis divergências entre os produtos do exterior.

Os painéis de piso de MLCC serão mais suscetíveis à delaminação do que as paredes devido à orientação da gravidade, de modo que isso pode causar efeitos adversos severos na resistência à integridade. Pesquisas futuras devem se concentrar tanto no tipo de adesivo, quanto na espessura da camada para resistência ao fogo dos painéis de MLCC (WESTHUYZEN *et al.*, 2020).

6 PÓS QUEIMA

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 do painel satisfaz o requisito para uma posterior vida útil. Logo, uma extensa pesquisa sobre os componentes de madeira pós queima (pós-incêndio) precisa ser realizada, principalmente em relação a painéis parede de MLCC, visto que se tem como objetivo 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 dos painéis de MLCC ao fogo, menos atenção tem sido dada à capacidade de carga residual das paredes de MLCC após o incêndio.

Nesse contexto, Bai *et al.* (2021^a) realizaram testes de fogo para investigar a capacidade de carga de compressão residual das paredes de MLCC (3 e 5 camadas) após exposição ao fogo de forma unilateral, 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 teste de compressão axial. É importante ressaltar que nenhuma carga foi aplicada durante o teste de incêndio para garantir a configuração dos painéis até a extinção.

Como resultado, Bai *et al.* (2021^a) mostraram que nos ensaios de capacidade de carga de compressão residual realizado à temperatura normal, o modo de falha das paredes de MLCC mudou de compressão axial típica para a compressão excêntrica após o fogo. Isso corrobora com os resultados encontrados por Suzuki *et al.* (2016) ao mostrarem que para as paredes submetidas à exposição unilateral ao fogo, 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. A comparação entre os valores calculados e testados experimentalmente após o incêndio, estão listados na tabela 9. Os erros relativos entre a capacidade de carga residual calculada a partir das fórmulas derivadas¹¹ desenvolvidas no

¹¹ A principal teoria empregada para a derivação das fórmulas que resultam na capacidade de carga residual é a teoria de flexão de vigas de Timoshenko, afim de considerar a deformação de cisalhamento e excentricidade inicial, além dos modelos teóricos - por exemplo, 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 da madeira após o incêndio.

próprio artigo e os resultados dos testes variaram de - 27,84% a 4,71%, indicando que as fórmulas forneceram uma previsão satisfatória das paredes de MLCC (Bai *et al.*, 2021^a).

Tabela 9 - Resultados de testes de fogo e do método de cálculo

Amostra	Altura residual [mm]	Profundidade carbonizada [mm]	Taxa de carbonização [mm/min]	Capacidade de carga compressiva residual [kN]	Valores calculados [kN]	Erro relativo [%]
R3-20	89,58	15,42	0,77	128,67	92,83	-27,84
R3-40	78,7	26,3	0,66	26,21	25,9	-1,18
R5-20	89,16	15,84	0,79	93,46	97,86	4,71
R5-40	79,75	25,25	0,63	87,50	91,55	4,63

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

Ainda assim, não existem muitos artigos utilizando como metodologia testes de carregamento com o objetivo de investigar a capacidade residual de paredes de MLCC expostas ao fogo, assim como métodos que utilizam simulação de elementos finitos para este fim são raros. Além disso, existem limitações nesses ensaios físicos como, por exemplo, a impossibilidade de inserção de termopares em todo o corpo de prova em testes de incêndio, gerando valores médios de temperatura do elemento (Bai *et al.*, 2021^b).

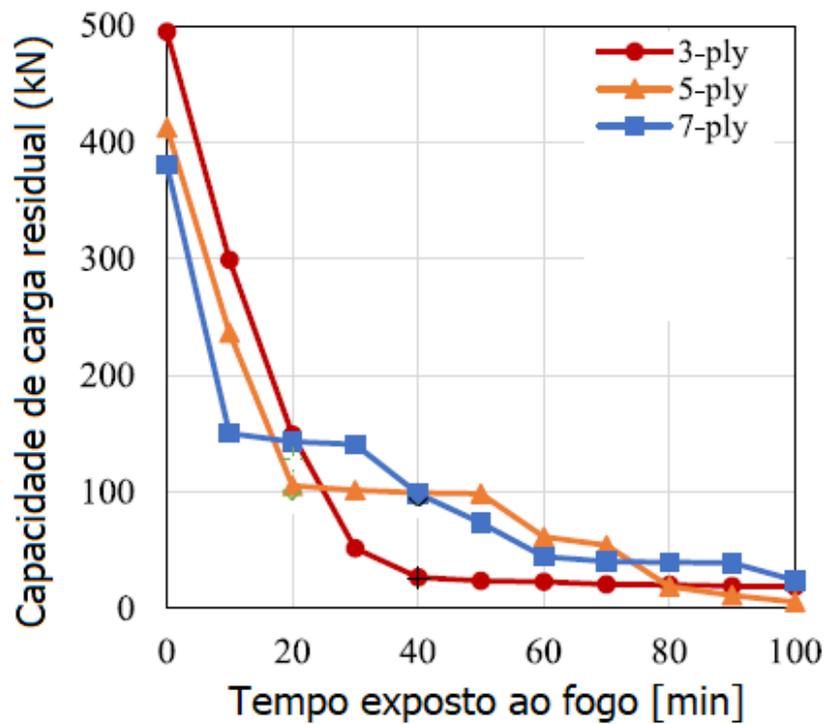
Pensando nisso, Bai *et al.* (2021^b) tiveram como objetivo estudar a capacidade de carga residual (CCR) da parede de MLCC após o incêndio através da realização de testes e modelos numéricos. Para isso, foi estabelecida uma abordagem numérica para determinar a CCR com base nos fenômenos experimentais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

Os resultados positivos das comparações, mostram que os modelos empregados são, portanto, ferramentas eficazes que contribuem para uma melhor compreensão dos comportamentos mecânicos das paredes de MLCC em múltiplas etapas físicas. A partir dos resultados dos testes, percebe-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 espécimes e condições de contorno, são iguais nos dois casos. As capacidades de carga residuais de paredes de MLCC com camadas variadas são calculadas pelos modelos numéricos à medida que o fogo avança, conforme representação na figura 13 (o número na legenda indica a quantidade de camadas). A partir desse modelo, é possível verificar que o declínio da capacidade residual, após incêndio,

das paredes de MLCC com mais camadas é relativamente menor em relação às paredes com poucas camadas. sendo as paredes identificadas com começo “R” submetidas ao teste de fogo (Bai *et al.*, 2021^b).

Por fim, os autores sugerem que um projeto de incêndio estrutural deve investigar a capacidade de carga residual após o incêndio em outros tipos de componentes estruturais e conexões de madeira. Para simular a condição real de serviço no edifício de madeira, várias condições de carregamento também devem ser levadas em consideração (Bai *et al.*, 2021^b).

Figura 13 - Modelo das capacidades de carga residual em paredes de MLCC



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

7 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi identificar as lacunas de conhecimento sobre o tema com o propósito de nortear os pesquisadores que virão a se interessar pelo tema em questão, tentando responder que aspectos e dimensões vêm sendo destacados e privilegiados em diferentes lugares. As seguintes conclusões que provêm deste referencial teórico são apresentadas abaixo:

- Os autores convergem em afirmar que o método da seção transversal reduzida não pode ser aplicado para paredes de MLCC. Concluem que o conceito de camada de resistência zero atual é uma aproximação pouco eficiente para se aplicar em materiais complexos como a MLCC quando exposto ao fogo, e avaliam que devido a isso, existe a necessidade de criar novos métodos;
- Diversos autores verificam que paredes de três camadas falharam significativamente mais cedo do que aquelas com cinco camadas. Portanto, o uso de paredes de MLCC de cinco camadas é recomendado para obter maior desempenho referente ao fogo;
- Foi descoberto que 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;
- Autores concordam que os adesivos de MUF, por serem mais rígidos e reticulados, apresentam desempenho melhor 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 tábuas adjacentes;
- Os painéis de piso de MLCC serão mais suscetíveis à delaminação do que as paredes devido à orientação da gravidade, de modo que isso pode causar efeitos adversos severos na resistência à integridade. Pesquisas futuras devem se concentrar tanto no tipo de adesivo, quanto na espessura da camada para resistência ao fogo dos painéis;
- A pesquisa de Westhuyzen *et al.* (2020) mostra que é necessário que se realizem estudos em paredes de MLCC que utilizam 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 sugerem que é preciso aprimorá-lo, levando em consideração as várias condições de carregamento.

Este trabalho forneceu uma compreensão do estado do conhecimento sobre a resistência de paredes de MLCC em situação de incêndio. Foi ordenado periodicamente o conjunto dessas informações, os resultados já obtidos e quais os assuntos ainda é preciso investigar. Espera-se que seja uma fonte de conhecimento para conduzir os pesquisadores que venham a ter interesse em estudar este tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7190 2022**: Projeto de estrutura de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.
- 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 1363-1 2012**: *Fire resistance tests—Part 1: General requirements*. Bruxelas: CEN, 2012.
- 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.
- DEMARZO, M. A.; PORTO, A. L. G. Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v. 8, n.21, jul./dez. 2007.
- DIAS, A. Madeira Massiva como Estrutura. In: Alan Dias. **Eng. Alan Dias CARPINTERIA 175**. Disponível em: <<https://issuu.com/alandias/docs/ebookcarpinteria/s/33186>>. Acesso em: 14 set. 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.
- FELIX, P. M. DE A. C. **Parâmetros de projeto para segurança contra o incêndio do sistema construtivo em Cross-Laminated Timber (CLT)**. 2020. 199 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- GOINA, M. *Fire resistance of cross-laminated timber wall panels*, University of Trieste, Trieste, Italy, 2010.

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

HÖFLING, C. **Estratégias de leitura: Skimming e Scanning**. Disponível em: <livresaber.sead.ufscar.br:8080>. 2012.

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.

LE, T. VAN; GHAZLAN, A.; NGO, T.; REMENNIKOV A.; KALUBADANAGE 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.

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.

PASSARELLI, R. N. **Madeira laminada cruzada: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. 2013. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. 2001. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Plataforma UNEP**. “Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019 - relatório da ONU”.

Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram>>. Acesso em: 06 set. 2022.

Primeiro edifício multipisos em madeira do brasil é inaugurado. In: Blog Amata Brasil. **AMATA**. São Paulo, 11 de dez. 2020. Disponível em: <<https://amatabrasil.com.br/primeiro-edificio-multipisos-em-madeira-do-brasil-e-inaugurado/>>. Acesso em: 6 set. 2022.

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

SCHMID, J.; KOENIG, 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. KOENIG, J.; KOHLER, 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.; FRAGIACOMO M. *et al. Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions*. **Fire Technol**, v. 51, p. 1341–1370, 2015^a.

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

SCHMID, J.; MENIS, A.; FRAGIACOMO 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 College, University of London (UK), p. 1143–1156, 2013.

SKIDMORE, O.; MERRILL, L.L.P. **Timber Tower Research Project**. Report. 2013. 105p.

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**, 2010, v. 44, p. 13–29, 2010.

THI, V.D.; KHELIFA, M.; OUDJENE, M.; EL GANAOUI, 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.

WALSH, N. "**O maior edifício de CLT no mundo é um modelo para habitações de alta densidade**" [*World's Largest CLT Building Provides a Model for High Density Urban Housing*] 16 Out 2018. ArchDaily Brasil. (Trad. Souza, Eduardo). Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/903936/o-maior-edificio-de-CLT-no-mundo-e-um-modelopara-habitacoes-de-alta-densidade>>. Acesso em: set. 2022.

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.; HADDEN, R. M. *Structural response of cross-laminated timber compression elements exposed to fire, Fire Safety Journal*. v. 91, p. 56-67, 2017.